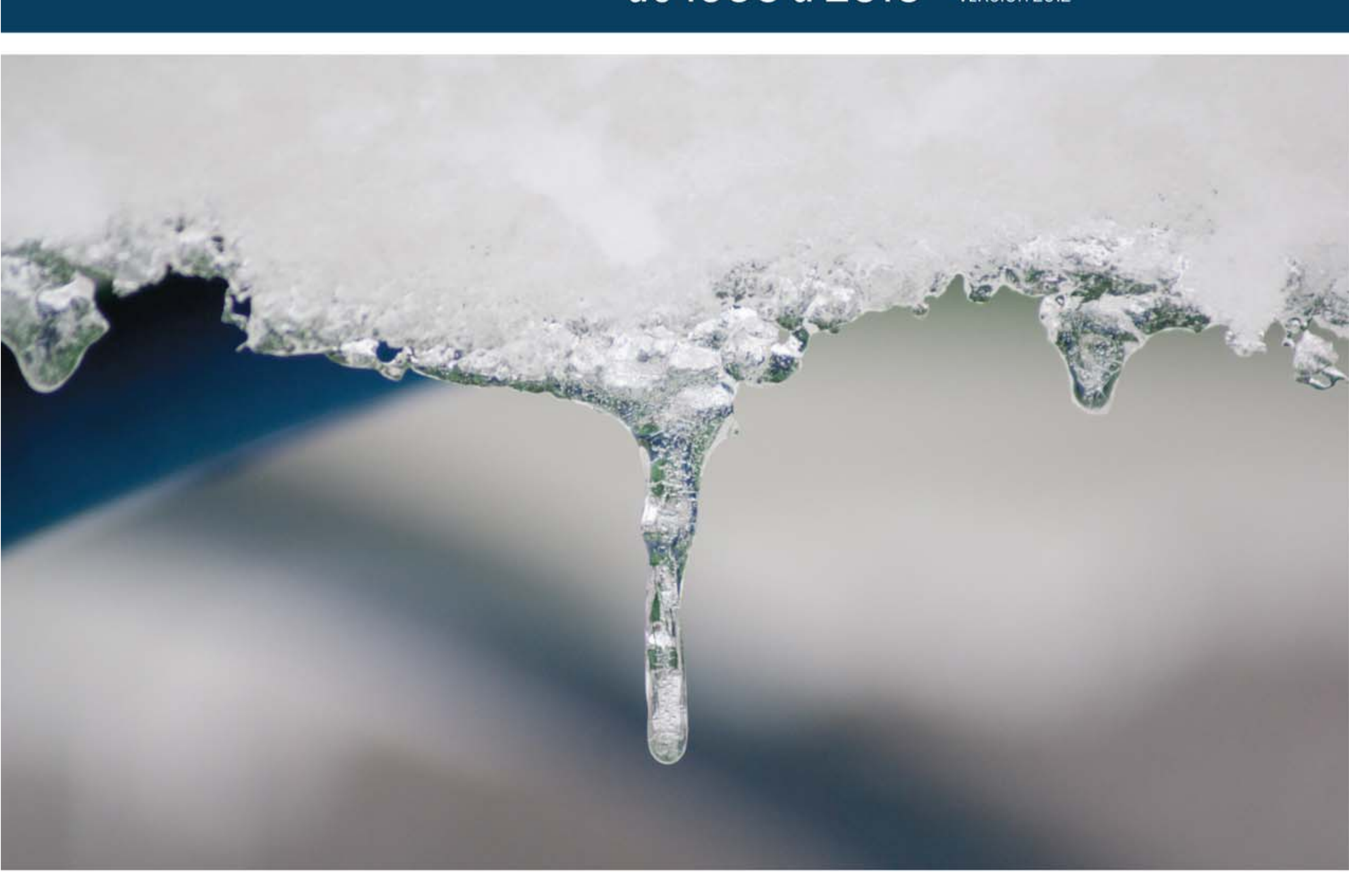
CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUÉBEC (CEHQ)

RECONSTITUTION HISTORIQUE DES APPORTS VERTICAUX (eaux de fonte et de pluie) de 1900 à 2010

VERSION 2012



Québec

Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES)

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)

Direction de l'expertise hydrique (DEH)

Service de l'hydrologie et de l'hydraulique

Équipe de réalisation

Chargé de projet et rédacteur :	Charles Poirier, ing. M.Sc.
Ingénieur de projet :	Thomas-Charles Fortier Filion, ing. M.Sc.
Responsable de la programmation :	Pierre Lacombe, analyste en informatique
Ressource en géomatique :	Éric Levasseur, technicien en géomatique
Révision :	Bernard Caron, DSÉE-SIMAT Éric Larrivée, DSÉE-SIMAT Richard Turcotte, ing. Ph. D.
Collaboration externe :	Pierre-Yves St-Louis, DSÉE-SIMAT
Correction et mise en page :	Colette Proulx, secrétaire

Québec

Mai 2014

Poirier, C., T.-C. Fortier Filion, R. Turcotte et P. Lacombe. 2014. Reconstitution historique des apports verticaux (eaux de fonte et de pluie) de 1900 à 2010 – version 2012. Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, CEHQ, ISBN 978-2-550-71155-1, 99 p.

La version actuelle du rapport a été produite en mai 2014. Elle remplace les versions de mars 2013 et de novembre 2012 et s'en distingue principalement par une révision du chapitre 1 et par l'ajout de la section 3.2.7. Les versions précédentes du document s'intitulaient « Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 – version 2012 ».

Pour toute question relative aux données d'apports verticaux issues de cette étude, le lecteur est invité à communiquer avec le CEHQ par courriel : cehq@mddelcc.gouv.qc.ca.

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2014

ISBN 978-2-550-71155-1 (PDF)

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ANNEXES

1 Introduction

1.1 Nature et utilité du produit

Par apports verticaux (AV), on désigne les quantités d'eau provenant de la fonte des neiges et de la pluie. En l'absence de neige au sol et lorsque la précipitation tombe sous forme liquide, les AV correspondent aux données de précipitation. Le reste du temps (lorsqu'il y a fonte de neige avec ou sans précipitation liquide), le calcul des AV devient fort utile aux hydrologues et hydrogéologues, puisque les AV constituent les volumes d'eau disponibles pour s'infiltrer dans le sol ou ruisseler. L'évapotranspiration n'entre pas dans les calculs des AV. Par contre, les pertes par sublimation peuvent être partiellement prises en compte dans les résultats d'AV, par le biais de données nivométriques lorsque ces dernières sont disponibles (détails aux sections 1.2 et 3.1).

Le présent document sert de référence à tout usager des données d'AV produites par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) à l'échelle quotidienne pour l'historique 1900-2010. Toutefois, la production de ces données a été entreprise en 2009 à la demande du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Le document s'adresse donc spécialement aux équipes universitaires engagées dans la réalisation du PACES afin de les soutenir dans leur compréhension de la nature et de la précision des AV.

Les AV constituent un type de variable calculé au sein du module de fonte du modèle hydrologique HYDROTEL, qui a été développé et mis au point à l'INRS-ETE. La référence Turcotte et coll. (2007) et le lien suivant présentent la méthodologie employée pour ces calculs, dans un mode d'usage opérationnel :
http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/apportsverticaux/fondementtheorique.htm

En 2004, le CEHQ a extrait le module de fonte d'HYDROTEL et l'a imbriqué au sein d'un algorithme visant à produire des AV au pas de temps de trois heures à des points d'une grille couvrant le Québec méridional. La section 3 détaille les caractéristiques de cette grille. Pour sa contribution au PACES, le CEHQ a modifié son programme de fabrication de grilles d'AV afin de l'adapter au pas de temps de 24 heures. Des efforts ont également été déployés pour adapter le code du module de fonte à des situations

particulières présentes dans l'historique lointain au début du 20e siècle, telle une faible densité de stations climatologiques sur le territoire à cette époque.

La connaissance des AV s'avère utile dans plusieurs applications, notamment :

- Pour la gestion des crues sur le Québec méridional durant les périodes où l'enneigement risque d'être important (de novembre à juin) : le CEHQ produit des AV « observés » et prévus pour la gestion prévisionnelle de ses barrages et livre quotidiennement des grilles d'AV à différents partenaires, principalement le ministère de la Sécurité publique (qui les emploie pour évaluer la lame de ruissellement observée et prévue en vue de gérer le risque d'inondation sur le territoire) et le MDDELCC qui les diffuse sur Internet pour le grand public au http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/apportsverticaux/index.htm;

- Pour la modélisation hydrologique : les AV permettent d'alimenter certains modèles hydrologiques de type pluie-débit qui n'incluent pas de modèle d'évolution et de fonte du couvert de neige (p. ex. le modèle MOHYSE; voir Fortier-Filion, 2011);

- Pour la réalisation de bilans hydriques : les AV constituent une estimation du volume d'eau disponible pour ruisseler ou s'infiltrer dans le sol durant les périodes où l'enneigement est probable. Dans le cadre du PACES, les AV peuvent notamment servir d'intrant aux groupes universitaires dans leurs estimations de la recharge des aquifères à l'étude.

La livraison de ce produit constitue une première en la matière et il est probable que d'autres versions du produit deviennent disponibles. En effet, d'une part, la méthodologie utilisée est susceptible d'être bonifiée; d'autre part, les données sont aussi susceptibles d'être actualisées.

Les équipes du PACES ont eu accès aux données d'apports verticaux en avril 2012. Cette version validée inclut des corrections ponctuelles appliquées à l'équivalent en eau de la neige au sol (ÉEN) simulé par le modèle de fonte. Ces corrections ont été réalisées à certaines dates de l'historique, lorsqu'un nombre suffisant de données d'ÉEN mesurées était disponible à partir des relevés nivométriques (section 3.1). En résumé, sur la grille du domaine à l'étude, le CEHQ a interpolé l'erreur d'estimation de l'ÉEN par

le modèle de neige (erreur = ÉEN simulé – ÉEN mesuré). Cette stratégie d'ajustement est présentée dans Turcotte et al. (2010). Ces ajustements ont pour effet de tenir compte partiellement, approximativement et indirectement des trois types d'éléments suivants :

1. L'imprécision des mesures de précipitations neigeuses réalisées par les précipitomètres totalisateurs dont sont dotées les stations climatologiques du Québec. Sur un territoire nordique comme celui du Québec, on rapporte que l'imprécision peut se manifester par un sous-captage de la neige aux stations climatologiques (p. ex., Sugiura et coll., 2006), principalement à cause de l'influence du vent;
2. L'imprécision des paramètres du modèle de fonte d'HYDROTEL obtenus par calage, ou l'imprécision du modèle de fonte lui-même. Ces imprécisions pourraient amener le modèle à sous-estimer ou surestimer l'ÉEN dans certaines conditions;
3. Les pertes d'ÉEN par sublimation, lesquelles ne sont pas prises en compte explicitement par le modèle de fonte employé.

1.2 Conditions d'utilisation des données d'apports verticaux

Usagers du PACES

Les équipes responsables de la production de livrables dans le cadre du PACES ont accès aux données d'apports verticaux sous forme de fichiers de séries temporelles pour les points de grille de leur zone d'étude.

Usagers potentiels hors PACES

Les apports verticaux peuvent aussi s'avérer intéressants pour des usagers hors PACES, c'est-à-dire des usagers qui utiliseront ces données à des fins non reconnues comme celles associées aux livrables du PACES.

Une demande doit être formulée par écrit à la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du CEHQ; certaines exigences sont requises, notamment en ce qui concerne la nature et la forme du projet au sein duquel les AV sont jugés requis par le demandeur.

1.3 Conditions d'utilisation de données sous-jacentes aux données d'apports verticaux

Divers types de données sont employés dans les calculs d'apports verticaux. Parmi les principaux types, notons la précipitation (P), la température minimale journalière (Tmin) et la température maximale journalière (Tmax). Ces données prennent la forme de fichiers de grilles (matrices) au terme de calculs d'interpolation, et celle de fichiers de séries temporelles au terme de l'extraction des données pour une sous-région de la grille du domaine.

Usagers du PACES

Les équipes responsables de la production de livrables dans le cadre du PACES ont accès aux données de P, de Tmin et de Tmax sous forme de fichiers de séries temporelles pour les points de grille de leur zone d'étude.

Usagers potentiels hors PACES

Les usagers qui souhaitent utiliser les données de P, de Tmin ou de Tmax à des fins de modélisation en dehors des travaux du PACES doivent présenter une demande par écrit à l'équipe du Service de l'Information du Milieu Atmosphérique (SIMAT) de la Direction du Suivi de l'État de l'Environnement (DSÉE) du MDDELCC (via infoclimat@mddelcc.gouv.qc.ca), en mettant l'auteur principal en copie conforme.

2 Données climatiques à la source des calculs d'apports verticaux

Pour la précipitation (P) et la température (T), qui peut être décrite avec la Tmin ou la Tmax, les données historiques comprises entre 1900 et 2010 inclusivement sont utilisées au pas de temps journalier. Ces données proviennent des stations avec observateur et des stations automatiques appartenant au MDDELCC (DSÉE–SIMAT, Programme de surveillance du climat).

Le modèle de fonte d'HYDROTEL, par lequel sont estimés les AV, peut être alimenté en données de P et de T seulement. Toutefois, lorsque des données de relevés nivométriques sont disponibles, ces dernières gagnent à être utilisées pour corriger les estimations du couvert de neige faites par le modèle. C'est à cette fin que les données tirées du Programme de surveillance du climat – volet relevés nivométriques du MDDELCC ont été utilisées. Pour les relevés nivométriques, le CEHQ ne s'est pas limité

à employer les données provenant des stations appartenant au MDDELCC (comme c'est le cas pour les données de P et de T). Afin de maximiser la couverture spatiale; les relevés transmis par les partenaires Hydro-Québec et Alcan RioTinto ont été inclus. Le CEHQ a procédé à un contrôle des valeurs aberrantes pour l'ensemble des données nivométriques. Au terme de cet exercice, certains relevés n'ont pas été retenus.

À titre informatif, les relevés nivométriques sont habituellement produits toutes les deux semaines, de janvier à avril (des relevés ont été exceptionnellement produits avant janvier et après avril pour quelques années dans l'historique 1900-2010). De plus, pour être utilisable, un relevé nivométrique doit compiler au moins deux variables parmi la hauteur de neige, la densité et l'ÉEN. Enfin, on distingue les valeurs mesurées de l'ÉEN tirées des relevés nivométriques de celles calculées (« ÉEN calculé ») journellement par le modèle de fonte.

3 Domaine d'application et méthodologie

3.1 Domaine d'application et méthode d'interpolation

Les données climatiques utilisées proviennent d'un grand nombre de stations réparties sur l'ensemble du territoire québécois. Les données relatives aux précipitations et aux températures mesurées aux stations climatologiques sont interpolées par krigeage simple isotropique sur une grille allant de 43° à 55° de latitude et de -80° à -60° de longitude avec une valeur à chaque 0,1°. Au total, le domaine compte donc 24 000 points de grille. Pour la précipitation et la température, un semi-variogramme différent est employé pour chacun des mois (36 semi-variogrammes ont été générés, soit un pour chaque mois de l'année pour P, Tmin et Tmax). Les annexes 1, 2 et 3 présentent les semi-variogrammes de P, de Tmin et de Tmax respectivement. Les semi-variogrammes de P sont de forme exponentielle, tandis que ceux de Tmin et de Tmax sont de forme linéaire.

Dans le cas de la neige au sol, les semi-variogrammes sont générés avec l'erreur entre le couvert de neige calculé par le modèle de fonte d'HYDROTEL et celui calculé par le modèle de fonte d'HYDROTEL, mais corrigé ponctuellement avec les données tirées des relevés nivométriques. Comme données d'estimation du couvert de neige, l'ÉEN et la hauteur de la neige sont ciblés. Des semi-variogrammes de l'erreur du modèle de

neige sur l'ÉEN et d'autres de l'erreur du modèle de neige sur la hauteur de neige ont ainsi été générés. Tous de forme exponentielle, ils sont présentés aux annexes 4 et 5 respectivement. Pour les mois de janvier à mai, l'effectif des relevés nivométriques est suffisant pour permettre de générer mensuellement un couple de semi-variogrammes de l'erreur du modèle de neige (sur l'ÉEN et sur la hauteur de neige). Depuis le début des années 1980, l'absence de mesure pour les mois d'octobre, novembre et décembre ne permet pas de générer des semi-variogrammes acceptables; pour ces mois, le couple de semi-variogrammes de l'erreur du modèle de neige en janvier est utilisé. De même, les mesures étant rares en juin, le couple de semi-variogrammes de l'erreur du modèle de neige en mai est appliqué pour juin.

3.2 Critères, contraintes et précision de l'interpolation

Le choix et le paramétrage de la méthode d'interpolation ont été établis en tentant de prendre en compte certaines caractéristiques particulières propres aux données climatiques ainsi qu'au domaine d'application. Les paragraphes suivants traitent sommairement des principaux aspects considérés.

3.2.1 Rayon d'étude et construction des semi-variogrammes

Le rayon d'étude d'un semi-variogramme définit la distance radiale maximum, autour de chaque station climatologique, à l'intérieur de laquelle on évalue la variance d'une variable. Chaque station située dans le voisinage délimité par ce rayon forme un couple avec la station de référence; on obtient donc un jeu de variances propre au jeu de couples de stations. Dans cette étude, on a choisi de regrouper les points de coordonnées (x : distance du couple, y : semi-variance) par classe de distance radiale (p. ex., classe 1 : 0 km < distance < 10 km, classe 2 : 10 km ≤ distance < 20 km, etc.) et par mois. Pour chaque classe de distance, on place ensuite en graphique la moyenne des semi-variances. Enfin, un semi-variogramme théorique est généré par optimisation, et ce dernier est caractérisé par une portée, un seuil et un effet pépite pour chaque mois.

Certaines contraintes sont utilisées pour adapter le rayon d'étude au type de variable à interpoler. À titre d'exemple, les rayons d'étude pour les deux types d'erreur du modèle de neige (sur l'ÉEN et sur la hauteur de neige) sont bornés à quelques centaines de kilomètres, et ce, pour éviter d'induire dans ces semi-variogrammes de fausses faibles

variances observables entre des massifs de neige de régions éloignées durant les mois où la distribution spatiale du couvert de neige s'avère fortement hétérogène. De cette façon, on prévient qu'en décembre et janvier, les premières accumulations de neige de la rive nord (de Charlevoix à la Côte-Nord) ne soient interprétées comme corrélées avec les accumulations de neige des Chic-Chocs et des Appalaches.

3.2.2 Prise en compte indirecte des systèmes dépressionnaires à l'échelle synoptique pour l'interpolation de la précipitation

En reconnaissant la grande variabilité des systèmes météorologiques affectant le Québec méridional, tant dans leur nature et leur échelle que dans leurs trajectoires, le CEHQ a choisi de procéder à un krigeage simple isotropique pour cette étude. Toutefois, des efforts ont été déployés pour tenir compte de la présence de systèmes dépressionnaires d'échelle synoptique affectant fréquemment le domaine d'application. Un système d'échelle synoptique peut, au cours d'une même journée, étendre son influence sur des distances appréciables (~1 000 km). L'approche retenue tente de prendre en compte indirectement la nature et l'axe des trajectoires typiques de ces événements lorsqu'ils traversent le Québec méridional.

Une approche alternative consisterait à procéder à un krigeage anisotropique. Selon certains travaux analysant la variance de la précipitation en fonction de divers axes (travaux débutés en 2012 au CEHQ en dehors des mandats du PACES), on observe les plus faibles variances selon un axe relativement parallèle au fleuve Saint-Laurent. Ce résultat est peu surprenant dans la mesure où plusieurs systèmes dépressionnaires d'échelle synoptique parcourent le Québec méridional selon des trajectoires assez parallèles à cet axe.

Tout en retenant l'usage du krigeage isotropique, on a choisi d'ajuster le rayon d'étude en tenant compte des résultats de ces travaux. Ainsi, pour les Tmin et Tmax, le rayon d'étude imposé est de 1 000 km. Il est défini selon la distance maximale existant entre deux régions du domaine éloignées selon un axe relativement parallèle au fleuve Saint-Laurent (p. ex., de l'île de Montréal à la Côte-Nord). L'hypothèse sous-jacente est qu'un système synoptique peut, au cours d'une même journée, avoir un rayon d'influence et une vitesse de propagation tels qu'ils affecteront le régime journalier de température de manière semblable dans la zone englobant ces régions. Pour la précipitation, le rayon d'étude est limité à 500 km, selon la même logique. Ce rayon plus court prend en

compte que la précipitation s'interpole moins bien que la température en fonction de la distance et que l'on doit éviter d'établir de fausses corrélations entre des événements météorologiques distincts, comme en été, lorsqu'il y a présence d'événements convectifs (orages) distribués de façon hétérogène sur le territoire.

3.2.3 Gradient altitudinal employé pour l'interpolation de Tmin et Tmax

L'altitude sous-tend la relation entre la pression et la température de l'air. Le gradient adiabatique sec est strictement dépendant de l'altitude, tandis que le gradient adiabatique humide est fonction de la température et de l'humidité de la masse d'air. Cette étude fait usage d'une stratégie assez répandue pour interpoler spatialement les données de température. Celle-ci consiste à : 1) rabattre l'altitude de toutes les stations mesurant la température à une valeur commune (ici, le niveau de la mer), 2) kriger les valeurs de température (Tmin et Tmax), 3) ramener les altitudes de stations à leurs valeurs originales. Lors de ces deux transformations linéaires (étapes 1 et 3), un gradient altitudinal adiabatique de 0,005 ˚C par mètre d'altitude (0,5 ˚C par 100 m) est appliqué. Cette valeur est basée sur une estimation du gradient effectif au Québec à partir de mesures de températures de certaines stations climatologiques de la province (Valery, 2008). Toutes les stations climatologiques étant situées au-dessus du niveau de la mer, le gradient est respectivement positif et négatif aux étapes 1 et 3 précitées.

3.2.4 Précision relative de l'interpolation

Il s'avère utile de décrire les différents rayons d'étude employés (section 3.2.1) puisque le rayon d'étude permet de générer un semi-variogramme théorique. Toutefois, ce sont les caractéristiques mêmes d'un semi-variogramme théorique (forme, portée, seuil, effet pépite) qui influencent directement le krigeage. En général, pour les semi-variogrammes de forme exponentielle, la portée est atteinte bien avant le rayon d'étude, ce qui signifie que la corrélation des valeurs en fonction de la distance cesse bien avant le rayon d'étude. L'annexe 1 montre que, pour la précipitation, la portée des semi-variogrammes mensuels varie de 98 km (juin) à 351 km (février). Pour la température, les semi-variogrammes sont de forme linéaire et la portée a moins de sens physique. Dans la présente section, on porte davantage attention à la précipitation, qui s'interpole moins bien que la température. À preuve, les portées mensuelles de la température sont considérables, étant toutes supérieures à 976 km pour la Tmin et la Tmax (voir les en-têtes des figures des annexes 2 et 3).

À mesure que l'on s'éloigne des sites des stations climatologiques, la précision des données interpolées aux points de grille diminue, pour devenir faible à partir de la portée. La valeur estimée aux points de grille, qui sont éloignés de toute station climatologique par une distance supérieure à la portée, correspond à la moyenne arithmétique des valeurs mesurées à l'ensemble des stations du domaine au pas de temps journalier. À défaut d'être d'une grande précision, cette moyenne constitue un estimateur peu biaisé.

Les considérations précédentes indiquent qu'un effectif considérable de stations climatologiques ne suffit pas à assurer une qualité d'interpolation homogène sur le domaine; une distribution de stations bien dispersées spatialement s'avère essentielle. C'est devant cette réalité qu'il a été jugé utile de produire des cartes illustrant, pour chaque année de l'historique 1900-2010, le nombre et la localisation des stations climatologiques en exploitation sur le domaine desquelles ont été extraites les données de P, de Tmin et de Tmax pour réaliser le krigeage sur l'ensemble du domaine. Cent onze (111) cartes ont ainsi été produites pour l'historique à l'étude. Dans un souci de parcimonie, l'annexe 6 présente 22 cartes issues de ce lot, à intervalle quinquennal. L'annexe 7 présente des cartes équivalentes pour les stations nivométriques.

Usagers du PACES par rapport aux usagers hors PACES

Les cartes des annexes 6 et 7 superposent les contours des zones à l'étude pour les phases du PACES 2009-2013 et 2012-2015. Ceci permet aux équipes du PACES d'apprécier la densité de stations présentes dans le voisinage des zones d'étude sous leur responsabilité durant les années de l'historique qu'ils ciblent. Pour tous les usagers hors PACES des données d'AV, les annexes 6 et 7 demeurent utiles, à condition de pouvoir repérer leur zone d'étude sur les cartes. Les deux prochaines sous-sections de la section 3.2.4 présentent une méthodologie simple visant à évaluer la précision relative de l'interpolation réalisée avec les données de P, de T, d'ÉEN et de hauteur de neige (HdeN) qui mènent aux calculs d'AV. Cette méthodologie est appliquée pour les zones d'étude du PACES, mais elle peut être employée envers toute autre zone à l'étude par les usagers d'AV hors PACES.

Pour la suite du document, on utilise les termes suivants :

- <u>Distance d'éloignement (DE)</u> *pour référer à la distance d'éloignement de n'importe quel site du domaine par rapport à la station de mesure la plus proche.*

- Distance d'éloignement maximale (DEM) *pour référer à la distance maximale séparant le point du domaine le plus éloigné de toute station de mesure la plus proche. Il convient de noter que, la plupart du temps dans ce rapport, DEM réfère à la distance maximale séparant le point des zones d'étude du PACES le plus éloigné de toute station de mesure la plus proche.*

Afin que l'interpolation par krigeage soit la plus précise possible, il est souhaitable que tous les points de grille d'une zone à l'étude soient éloignés de toute station climatologique par une distance inférieure à la portée des semi-variogrammes mensuels puisque, dans ces conditions, la variance est corrélée avec la distance. Il est donc d'intérêt de vérifier la valeur du rapport α = DE/portée, et, en particulier, la valeur critique de ce rapport, soit $\alpha_{critique}$ = DEM/portée minimale. Plus la valeur de ces rapports est inférieure à l'unité, plus il est probable que la précision de l'estimation au point de grille résultant de l'interpolation soit grande.

3.2.4.1 Variables Tmin, Tmax et P

Variables Tmin et Tmax

À partir des cartes présentées à l'annexe 6 et des données de portées mensuelles présentées aux en-têtes des figures des annexes 2 et 3, il est possible d'estimer la valeur des rapports $\alpha_{critique\ Tmin}$ et $\alpha_{critique\ Tmax}$.

Sur le territoire du Québec méridional (au sud du 51e parallèle)

1. Pour la portion de l'historique avant 1940, une analyse des annexes 6.1, 6.2 et 6.3 montre que la DEM est de 395 km (en référence au point du domaine de coordonnées 51° de latitude et -75° de longitude en 1905 et 1910). Avec une portée minimale de 976 km pour la Tmin et de 989 km pour la Tmax (en-têtes des annexes 2 et 3), on obtient $\alpha_{critique\ Tmin} \approx \alpha_{critique\ Tmax}$ = 40 %. Or, à 40 % de la portée des semi-variogrammes linéaires montrés aux annexes 2 et 3, la corrélation de la variance en fonction de la distance s'avère très bonne. En outre, pour plusieurs sites du domaine distants des stations climatologiques de 250 km et moins, on obtient $\alpha_{Tmin} \approx \alpha_{Tmax}$ = 25 %, ce qui témoigne d'une excellente corrélation de la variance en fonction de la distance pour les semi-variogrammes des annexes 2 et 3. Avant 1940, la précision du krigeage de Tmin et de Tmax au

sud du 51e parallèle varie donc de très bonne à excellente, selon que le point de grille est le plus éloigné de toute station climatologique, ou situé à environ 250 km et moins de toute station.

2. À partir de 1940, les annexes 6.4 et suivantes montrent que la densité des stations climatologiques continue d'augmenter graduellement et assez uniformément jusqu'en 2010. En utilisant la même procédure d'analyse fondée sur l'estimation des rapports $\alpha_{critique\ Tmin}$ et $\alpha_{critique\ Tmax}$, la précision du krigeage de Tmin et de Tmax est estimée excellente en tout point, à l'exception du secteur non loin du coin supérieur gauche de ce sous-domaine borné au nord par le 51e parallèle, où la précision du krigeage est estimée très bonne.

Sur le territoire entre les 51e et 55e parallèles

3. Durant certaines décennies où l'effectif de stations climatologiques est le plus élevé et assez bien distribué autour du 50e parallèle, l'analyse fondée sur l'estimation des rapports $\alpha_{critique\ Tmin}$ et $\alpha_{critique\ Tmax}$ suggère que la précision du krigeage de Tmin et de Tmax est très bonne au nord du 51e parallèle, et ce, probablement jusqu'au 55e parallèle qui constitue la limite supérieure du domaine d'application (section 3.1). Selon la figure 4 et l'annexe 6, la période concernée s'étendrait plus ou moins entre 1965 et 1980.

Variable P (précipitation)

À partir des cartes présentées à l'annexe 6 et des données de portées mensuelles présentées aux en-têtes des figures de l'annexe 1, il est aussi possible d'estimer la valeur du rapport $\alpha_{critique}$ pour la précipitation. La portée mensuelle minimale de P est de 98 km en juin, laquelle est arrondie à 100 km pour simplifier l'analyse subséquente. Le rapport $\alpha_{critique\ P}$ = DEM (km)/100 km est ainsi analysé, en vérifiant s'il excède l'unité. Un résumé des constats de l'analyse qui suit est présenté à la fin de la présente sous-section.

La figure 1 présente la carte de l'année 1925 (tirée de l'annexe 6). Le choix de cette année-là s'explique du fait qu'à partir de 1925, le rapport $\alpha_{critique\ P}$ semble demeurer inférieur à l'unité dans les zones d'étude du PACES, et semble diminuer en général

d'année en année, ce qui témoigne d'une amélioration constante de la précision des estimations de P. Les paragraphes suivants détaillent cette appréciation.

Hormis l'ouest de la zone d'étude du PACES de l'Outaouais, on peut estimer que la valeur du paramètre DEM est d'environ 75 km sur la figure 1 pour les zones d'étude du PACES, ce qui correspond donc à $\alpha_{\text{critique P}}$ = 75 %. À 75 % de la portée d'un semi-variogramme de forme exponentielle (la forme propre aux semi-variogrammes de P), la corrélation de la variance en fonction de la distance peut être jugée relativement faible. Dans les zones du PACES en juin cette année-là, il existe donc certains points de grille particulièrement distants de toute station climatologique où la précision de l'estimation est relativement faible. Néanmoins, l'estimation aux autres points de grille des zones du PACES est d'une meilleure précision, et ce, plus les points de grille sont rapprochés des sites de stations climatologiques.

En résumé, on peut affirmer les énoncés suivants pour caractériser la précision du krigeage des valeurs de P aux points de grille des zones du PACES :

4. <u>En 1925, pour la plupart des points de grille constituant les zones d'étude du PACES</u> (où DE ≈ 50 km à la figure 1), la précision du krigeage des valeurs de P varie de moyenne à excellente. *Cette affirmation vient du fait que la valeur de α_P varie respectivement de 51 % (soit 50 km/98 km) en juin à 14 % (soit 50 km/351 km) en février.*

5. <u>En 1925, pour certains points de grille de zones d'étude du PACES particulièrement distants de toute station climatologique</u> (points de grille de DEM ≈ 75 km sur la figure 1), la précision du krigeage des valeurs de P s'avère en général de moyenne à très bonne sur la base du rapport α_P, mais est relativement faible en juin. *En effet, durant les onze mois de l'année autres que juin, la valeur de α_P varie de 49 % (soit 75 km/154 km) en août à 21 % (soit 75 km/351 km) en février. Or, avec ces valeurs de α_P, la précision du krigeage de P peut être jugée respectivement de moyenne à très bonne.*

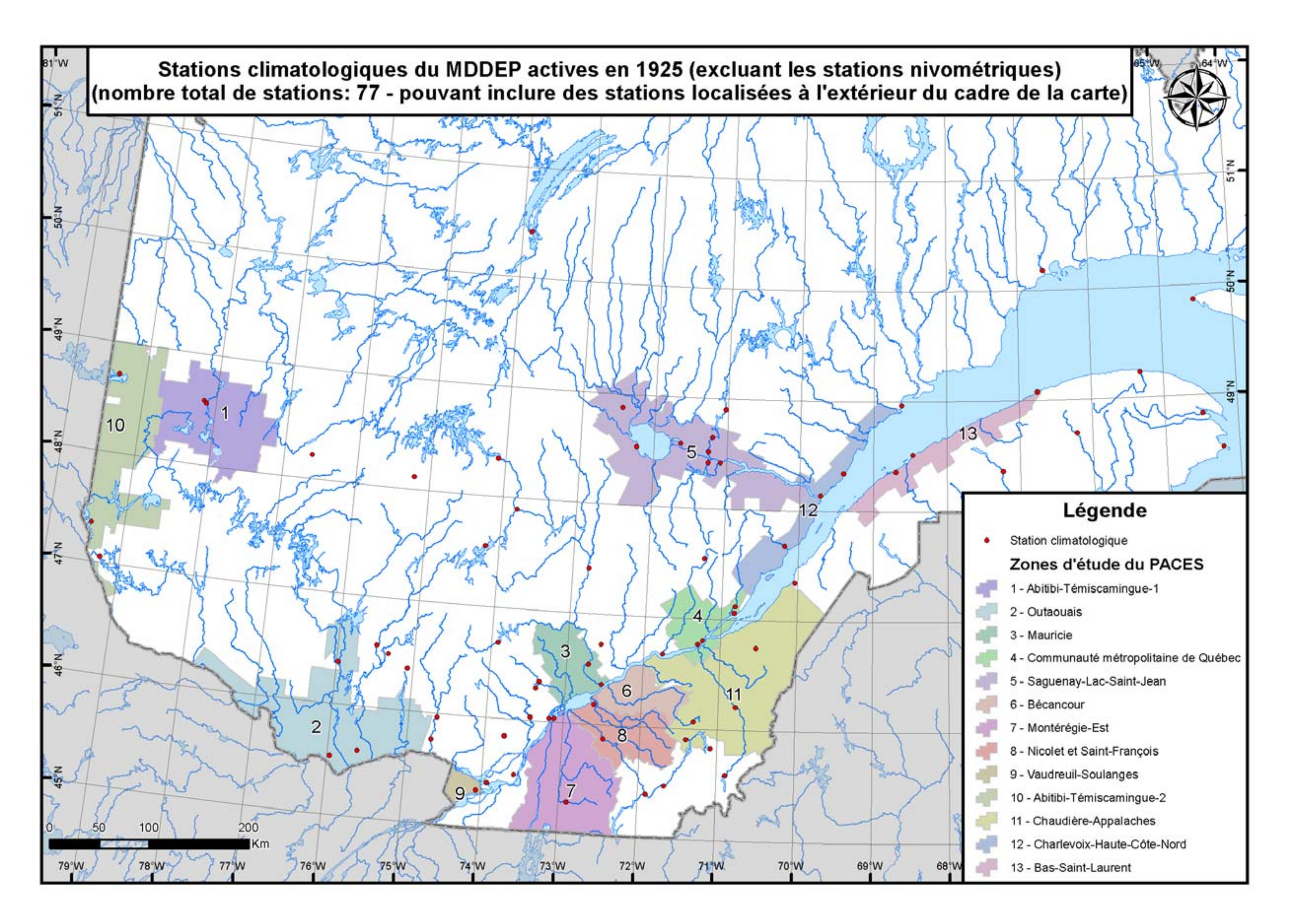


Figure 1 Stations climatologiques ouvertes en 1925 sur le territoire du Québec méridional

6. De 1926 à 2010 : à partir de 1926 jusque vers 1950, le nombre ainsi que la densité de stations climatologiques augmentent substantiellement dans les zones d'étude du PACES (voir les figures de l'annexe 6). Conséquemment, la précision du krigeage des valeurs de P en ces endroits s'améliore de façon soutenue pour devenir excellente à partir de 1950, et ce, peu importe la zone du PACES et le mois de l'année.

7. De 1900 à 1924 : inversement, avant 1925, la précision du krigeage des valeurs de P aux points de grille des zones d'étude du PACES s'avère inférieure à celle décrite pour l'année 1925 aux points 4 et 5 ci-dessus.

3.2.4.2 ÉEN, hauteur de neige et apports verticaux

Il existe deux types de variabilité en ce qui concerne les mesures de neige. D'abord, le nombre et la localisation des stations (sites) nivométriques fluctuent dans l'historique. Les figures de l'annexe 7 sont produites pour illustrer ces variations de l'effectif et de la distribution spatiale, et l'axe de droite de la figure 2 illustre cette variation de l'effectif. Ensuite, le nombre de relevés nivométriques réalisés à chaque station varie lui aussi dans le temps. La figure 2 a été produite pour faire la synthèse de ces deux types de variabilité. Sur l'axe de gauche, la figure présente donc la variation du nombre total de mesures de neige (ÉEN et HdeN) réalisées pour chacun des mois de l'historique, pour l'ensemble du territoire du Québec.

La figure 2 indique que les valeurs d'ÉEN et de HdeN calculées par le modèle de fonte n'ont pas été corrigées avant 1928, faute de données de mesures de neige disponibles. En outre, de 1928 à 1948, les valeurs d'ÉEN et de HdeN calculées ont été corrigées par un nombre négligeable de valeurs mesurées, provenant de campagnes réalisées en mars seulement. Les figures 7.1 à 7.5 montrent qu'en général les quelques stations nivométriques présentes entre 1928 et 1948 n'étaient pas distribuées de façon homogène sur le Québec méridional. Plus précisément, la figure 7.5 indique que, sur les treize zones d'étude du PACES indiquées, seules celles de l'Outaouais, du Saguenay–Lac-Saint-Jean et de la Mauricie étaient pourvues de stations nivométriques en 1945.

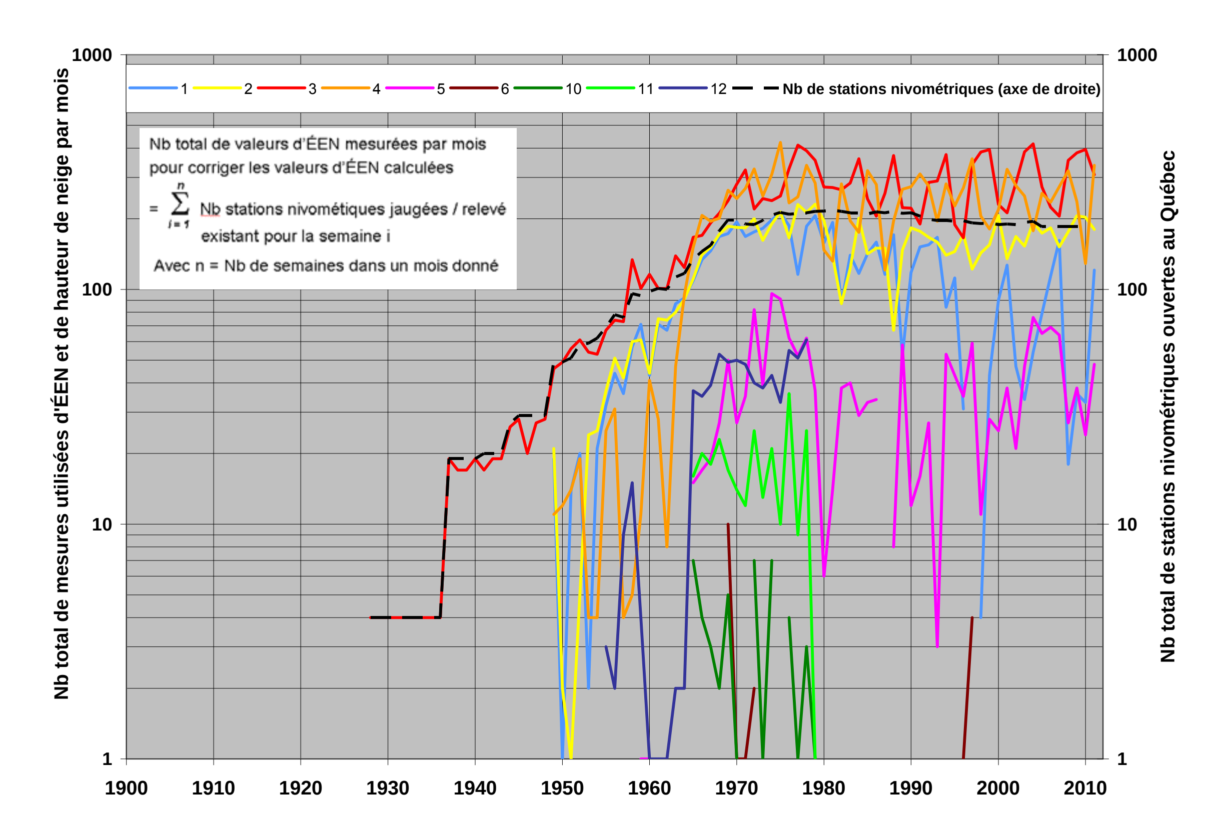


Figure 2 Nombre total de mesures de neige utilisées par mois pour corriger les valeurs d'ÉEN et de hauteur de neige calculées. Le numéro du trait correspond au mois.

La figure 2 montre également qu'à partir de 1949, des mesures de neige sont disponibles de janvier à avril, ce qui accroît le nombre de corrections du couvert de neige estimé et, par conséquent, la précision des AV calculés durant ces mois. Ce gain de précision pour l'estimation des AV a surtout un impact important en mars et avril puisque les AV sont généralement très faibles en janvier et février.

Le nombre de stations nivométrique augmentant avec les années en général (figure 2), la densité de stations nivométriques s'améliore en général avec le temps. En 1950, environ la moitié des zones d'étude du PACES comprend au moins une station nivométrique (figure 7.6), alors qu'en 1965, dix des treize zones d'étude en sont pourvues.

La figure 2 illustre qu'à partir de 1965 le nombre total de mesures de neige (ÉEN et HdeN) en avril augmente d'environ un ordre de grandeur, et des relevés nivométriques deviennent disponibles en mai. Des relevés nivométriques sont également disponibles en novembre et décembre de 1965 à 1978. Or, la majorité des AV incluant des eaux de

fonte sont surtout générés en avril et mai, et également en mars et décembre sur le territoire du Québec méridional. Conséquemment, ces accroissements d'effectifs de mesures de neige durant ces mois ont un impact important sur l'amélioration de la précision des AV à partir de 1965. Toutefois, cette amélioration de précision des AV se concrétise principalement aux régions du domaine situées non loin des stations nivométriques, comme il est énoncé dans les prochains paragraphes.

À partir des cartes présentées à l'annexe 7 et des portées mensuelles des semi-variogrammes présentées aux en-têtes des figures des annexes 4 et 5, il est possible d'utiliser la méthodologie décrite à la section précédente pour tenter d'estimer la valeur du rapport $\alpha_{critique}$ pour l'ÉEN et la HdeN. En guise de rappel, $\alpha_{critique}$ = DEM/portée minimale. Un résumé des constats découlant de l'analyse qui suit est présenté à la fin de la présente sous-section.

Pour les mois d'octobre à janvier ainsi qu'en avril

Sur la base que l'année 1965 constitue en quelque sorte une année charnière sur le plan des effectifs de mesures de neige, l'analyse qui suit se réfère à la carte de l'annexe 7.9. De janvier à avril, l'annexe 4 montre que la portée est respectivement de 85 km, 137 km, 227 km et 73 km pour l'erreur du modèle de neige sur l'ÉEN. L'annexe 5 montre quant à elle que, pour ces mêmes mois, la portée est respectivement de 71 km, 101 km, 268 km et 579 km pour l'erreur du modèle de neige sur la HdeN. Rappelons que les semi-variogrammes de janvier sont employés pour réaliser l'interpolation des deux types d'erreur du modèle de neige (sur l'ÉEN et sur la HdeN) pour les mois d'octobre à décembre. Pour simplifier l'analyse subséquente, on peut arrondir la portée mensuelle minimale à 70 km en avril pour l'erreur du modèle de neige sur l'ÉEN, et à 70 km d'octobre en janvier pour l'erreur du modèle de neige sur la HdeN. On analyse ainsi la valeur des rapports $\alpha_{critique\ erreur\ ÉEN}$ et $\alpha_{critique\ erreur\ HdeN}$, lesquels correspondent à DEM (km)/70 km. Afin d'alléger le texte, on emploie $\alpha_{critique\ erreur\ neige}$ pour la suite de l'analyse pour référer tant à $\alpha_{critique\ erreur\ ÉEN}$ qu'à $\alpha_{critique\ erreur\ HdeN}$.

L'analyse de la carte de l'annexe 7.9 indique que la DEM peut être estimée aussi à 70 km pour l'ensemble des zones d'étude du PACES en 1965. On a donc $\alpha_{critique\ erreur\ neige}$ = 100 % pour les mois d'octobre à janvier ainsi qu'en avril pour les zones d'étude du PACES en 1965. Rappelons que $\alpha_{critique}$ = 100 % indique que les points de grille

concernés sont éloignés de toute station nivométrique au point qu'il n'existe plus de corrélation entre les deux types d'erreur du modèle de neige au-delà cette distance d'éloignement. À ces points de grille très distants, la précision du krigeage des deux types d'erreur du modèle de neige est donc très faible durant les mois d'octobre à janvier ainsi qu'en avril au cours de l'année 1965. Il en va de même pour la précision des calculs d'AV réalisés à ces points de grille durant ces périodes. Notons que quelques points de grille du domaine sont caractérisés par une valeur DEM > 70 km (le nord-est de l'Abitibi-Témiscamingue-1, l'ouest de Vaudreuil-Soulanges, le secteur central du corridor Charlevoix-Côte-Nord ainsi que le nord-est du Bas-St-Laurent). Dans ces secteurs isolés, la précision du krigeage des deux types d'erreur du modèle de neige et la précision des AV sont jugées médiocres en 1965

Toutefois, l'analyse de la carte de l'annexe 7.9 montre également que la distance moyenne d'éloignement des points de grille des zones d'étude PACES aux stations nivométriques les plus proches peut être estimée à DE = 40 km. On obtient ainsi le rapport $\alpha_{erreur\ neige}$ = DE/portée minimale = 57 % durant les mois d'octobre à janvier ainsi qu'en avril au cours de l'année 1965. Or, avec cette valeur de $\alpha_{erreur\ neige}$, la précision du krigeage de L'ÉEN et de HdeN peut être jugée moyennement bonne.

Pour les mois de mai à juin inclusivement

Sur la base que l'année 1965 constitue en quelque sorte une année charnière sur le plan des effectifs de mesures de neige, l'analyse qui suit se réfère également à la carte de l'annexe 7.9. Rappelons que les semi-variogrammes de mai sont employés pour réaliser l'interpolation des deux types d'erreur du modèle de neige au mois de juin. Or, en mai, les portées chutent drastiquement (5 km pour l'erreur du modèle de neige sur l'ÉEN et 13 km pour l'erreur du modèle de neige sur la HdeN), ce qui reflète la forte hétérogénéité du couvert nival au début du printemps. Avec des portées si faibles, le krigeage des deux types d'erreur du modèle de neige (ÉEN et HdeN) revient rapidement à appliquer comme estimateur la moyenne de l'ensemble des valeurs aux points de mesures au pas de temps journalier. Cet estimateur peu précis conduit à des résultats de calculs d'AV de faible précision durant ces mois.

Résumé

En résumé, on peut affirmer les énoncés suivants pour caractériser la précision du krigeage des valeurs des deux types d'erreur du modèle de neige (ÉEN et HdeN), ainsi que la précision des calculs d'AV réalisés aux points de grille des zones du PACES. Le lecteur notera que les énoncés ci-dessous qui traitent de la précision des AV réfèrent aux AV calculés durant les mois où la présence de neige au sol n'est pas impossible; le reste du temps, les AV correspondent aux données de précipitation.

8. De 1900 à 1948 : comme l'illustre la figure 2, durant ces années, un nombre nul ou négligeable de mesures de neige ont été réalisées. Conséquemment, les estimations du couvert de neige réalisées par le modèle de fonte ne peuvent être corrigées à une fréquence suffisante, ce qui mène à des calculs d'AV très peu précis, même à proximité des stations nivométriques.

9. De 1949 à 1965 : la figure 2 montre que, durant ces années, le nombre de mesures de neige s'accroît quelque peu, mais demeure relativement faible en décembre et avril. Or, ces mois sont parmi ceux générant le plus d'AV incluant des eaux de fonte. Le faible nombre de corrections appliquées au couvert nival simulé par le modèle de fonte mène à des résultats de calculs d'AV peu précis durant la majeure partie de cette période de l'historique.

10. En 1965 : pour la majorité des points de grille de zones d'étude du PACES (points de grille de DE ≈ 40 km, réf. annexe 7.9), la précision du krigeage des deux types d'erreur du modèle de neige (ÉEN et HdeN) est jugée moyennement bonne (mois 10, 11, 12, 1 et 4), excellente (mois 2 et 3) ou très faible (mois 5 et 6). *Cette affirmation vient du fait que* $\alpha_{erreur\ neige}$ *= 57 % (soit 40 km/70 km) pour les mois d'octobre à décembre ainsi qu'en avril. De plus,* $\alpha_{erreur\ neige}$ *varie de 35 % en février (soit 35 km/ 101 km) à 13 % en mars (soit 35 km/268 km). Enfin,* $\alpha_{erreur\ neige}$ *> 100 % en mai et juin dès que DE > 5 km.*

    Pour les autres points de grille des zones du PACES qui sont très éloignés de toute station nivométrique (DEM ≈ 70 km, réf. annexe 7.9), la précision du krigeage des deux types d'erreur du modèle de neige (ÉEN et HdeN) varie de très faible (mois 10, 11, 12, 1, 4, 5 et 6) à moyenne (mois 2 et 3). *Cette affirmation vient du fait que* $\alpha_{erreur\ neige}$ *= 100 % (soit 70km/70 km) pour les mois*

d'octobre à décembre ainsi qu'en avril. De plus, $\alpha_{\text{erreur neige}}$ *varie de 69 % en février (soit 70 km/101 km) à 26 % en mars (soit 70 km/268 km). Enfin,* $\alpha_{\text{erreur neige}}$ *> 100 % en mai et juin dès que DE > 5 km.*

L'effectif des mesures de neige s'avérant appréciable de décembre à avril en 1965 (figure 2), il en résulte que la simulation corrigée du couvert de neige ainsi que les résultats de calculs d'AV sont entachés d'une précision semblable à celle mentionnée aux deux paragraphes précédents pour l'année 1965.

11. De 1966 à 2010 : durant ces années, les mesures de neige disponibles pour la correction du couvert de neige simulé sont nombreuses pour les mois de janvier à mai, ainsi qu'en novembre et décembre durant l'intervalle 1966-1978 (figure 2). La densité spatiale des stations nivométriques augmente par ailleurs pour devenir appréciable à partir de 1980 (annexes 7.9 à 7.12). À titre d'exemple, l'annexe 7 montre que c'est à partir de 1980 que toutes les zones d'étude du PACES deviennent pourvues de stations nivométriques.

    La densité des stations nivométriques demeure toutefois faible pour certaines zones d'étude du PACES (surtout les deux zones de l'Abitibi-Témiscamingue, l'ouest de l'Outaouais, Charlevoix-Haute-Côte-Nord et le Bas-Saint-Laurent). En conséquence, pour ces régions, les constats énoncés au point 10 demeurent valides de 1966 à 2010. Pour les autres régions des zones d'étude du PACES, ces constats demeurent valides au début de l'horizon 1966-2010, mais, en général, la précision du krigeage des deux types d'erreur du modèle de neige (ÉEN et HdeN) ainsi que des calculs d'AV s'améliore sensiblement et graduellement jusqu'en 1980, puis demeure relativement constante jusqu'en 2010.

3.2.5 Facteurs non pris en compte

Il est à noter que, dans la présente étude, certaines particularités régionales n'ont pas été prises en compte explicitement. Parmi celles-ci, on retrouve notamment l'orientation des versants qui détermine l'exposition à la radiation solaire directe ainsi que la pente qui contrôle les écoulements de l'air le long des versants. Certaines de ces particularités ont une assez faible variabilité spatiale à l'échelle macroscopique sur le Québec méridional. Il en va autrement de certaines autres, telle la proximité de grandes masses

d'eau (fleuve, estuaire), principalement. Dans ce cas, même à l'échelle macroscopique, on note une distribution relativement hétérogène, menant potentiellement à des conséquences importantes sur la distribution spatiale de certaines variables climatiques.

3.2.6 Éléments à considérer lors d'une éventuelle refonte de la banque d'AV

Compte tenu des commentaires de la section précédente, il apparaîtrait pertinent, lors d'une éventuelle révision des apports verticaux, de tenter de prendre en compte l'influence des grandes masses d'eau, par exemple par krigeage avec dérive externe ciblant la localisation des stations climatologique par rapport à une grande masse d'eau. D'ici là, il convient de reconnaître que les valeurs de P, de Tmin et de Tmax aux points de grille du domaine d'application influencés par cette particularité régionale sont potentiellement moins précises qu'ailleurs du fait que le krigeage n'a pas été adapté en conséquence.

De même, étant donné que les limites du domaine d'application (de la grille) s'étendent relativement loin des régions densément instrumentées en stations climatologiques (annexe 6), il apparaîtrait intéressant de songer à appliquer le krigeage par sous-domaine, conformément à l'analyse présentée à la section 3.2.4. Sous réserve de vérifications à réaliser, il est probable qu'un krigeage régionalisé améliore en effet la performance de la moyenne comme estimateur pour les points de grille du domaine étant éloignés de toute station climatologique par une distance supérieure à la portée des semi-variogrammes (dépendamment de la variable interpolée et du mois).

L'utilisation de données provenant de réseaux de stations climatologiques exploités sur les territoires des provinces et des États frontaliers du Québec (Ontario, Nouveau-Brunswick, New York, Vermont, New Hampshire et Maine) améliorerait sans doute la précision des calculs d'AV aux points de grille situés près des frontières du Québec.

D'autres idées d'améliorations sont susceptibles d'être considérées et ajoutées à la liste de la présente section.

3.2.7 Erreurs découvertes après la diffusion des apports verticaux

Aux annexes 4 et 5, l'erreur d'application suivante a été notée : un rayon d'étude de 275 km (et non 500 km) aurait dû être imposé pour générer les semi-variogrammes

théoriques du mois de mai, comme c'est le cas pour le mois de janvier (raisons énoncées à la section 3.2.1).

Concernant l'interpolation des données de P, on a également constaté que les portées mensuelles employées pour le krigeage de P s'avèrent en réalité trois fois inférieures à celles affichées sur les semi-variogrammes de l'annexe 1, lesquels sont jugés fiables. Conséquemment, l'interpolation des observations de P qui sont très peu distribuées spatialement est réalisée en sous-pondérant l'influence des valeurs de P des stations environnantes. Pour ces cas, l'interpolation est jugée insuffisamment lissée. Sur la base de vérifications sommaires effectuées en 2013, on peut estimer les impacts suivants découlant de cette erreur (prendre bien note qu'il s'agit d'impacts estimés). Sur de petites étendues de territoire touchées par des observations de P très peu distribuées spatialement, les volumes des précipitations krigées avec cette erreur peuvent s'avérer significativement supérieurs des volumes de précipitations krigées sans cette erreur (différence > 10% probablement). Sur des étendues de territoire moyennes à grandes (ex. > 100 km^2), touchées par des observations de P très peu distribuées spatialement, les différences de volumes de précipitation résultant de cette erreur peuvent s'avérer relativement faibles (différence < 10% probablement).

4 Analyse des données sources et des résultats de calculs

4.1 Données sources

Les données utilisées sont les données originales aux stations. Ainsi, elles ne sont pas corrigées pour tenir compte des modifications apportées aux programmes de mesure, tels les déplacements de stations et les changements d'observateurs et d'instruments.

4.1.1 Données climatiques

La qualité des données varie selon l'amélioration des technologies disponibles. Avant novembre 1976, les données d'observation biquotidienne n'étaient pas conservées : la qualité des données quotidiennes est ainsi difficile à assurer selon les standards actuels. Par la suite, les données d'observation étaient saisies plus rapidement, conservées et validées : le niveau de qualité des données est donc supérieur. Depuis mars 2000, les données d'observation sont directement saisies par un observateur à un terminal et transférées automatiquement dans une unité de traitement. Un système de validation

plus élaboré et rigoureux est en place et toutes les métadonnées permettant l'évaluation des données sont sécurisées.

Les stations automatiques ont été mises en place durant les années 1970. La qualité des données issues de ce type de stations a également évolué au fil du temps. Tout de même, encore aujourd'hui, ces mesures peuvent différer de celles des stations avec observateur. Les thermistances devant être placées plus haut afin de ne pas être atteintes par le couvert de neige au sol en hiver, elles ne sont donc pas abritées par le même type d'écran, ce qui a un effet sur la comparabilité des mesures avec celles prises aux stations avec observateur. La mesure des précipitations diffère parfois beaucoup également, tout particulièrement dans le cas des données hivernales. Afin d'améliorer la couverture spatiale, les données des stations automatiques ont tout de même été utilisées d'égal à égal avec celles des stations avec observateur. Pour en savoir davantage sur la méthodologie et l'instrumentation employées pour la collecte des données des stations climatologiques, le lecteur peut se référer au manuel d'instruction à l'usage des observateurs en météorologie produit par le SIMAT (MDDEP, 2007).

Les figures 3 et 4 illustrent le nombre de stations climatologiques disponibles au Québec, selon les années, pour les zones d'étude du PACES en date de novembre 2012. Sur la figure 4, on a ajouté le nombre total de stations climatologiques actives au Québec durant ces mêmes années.

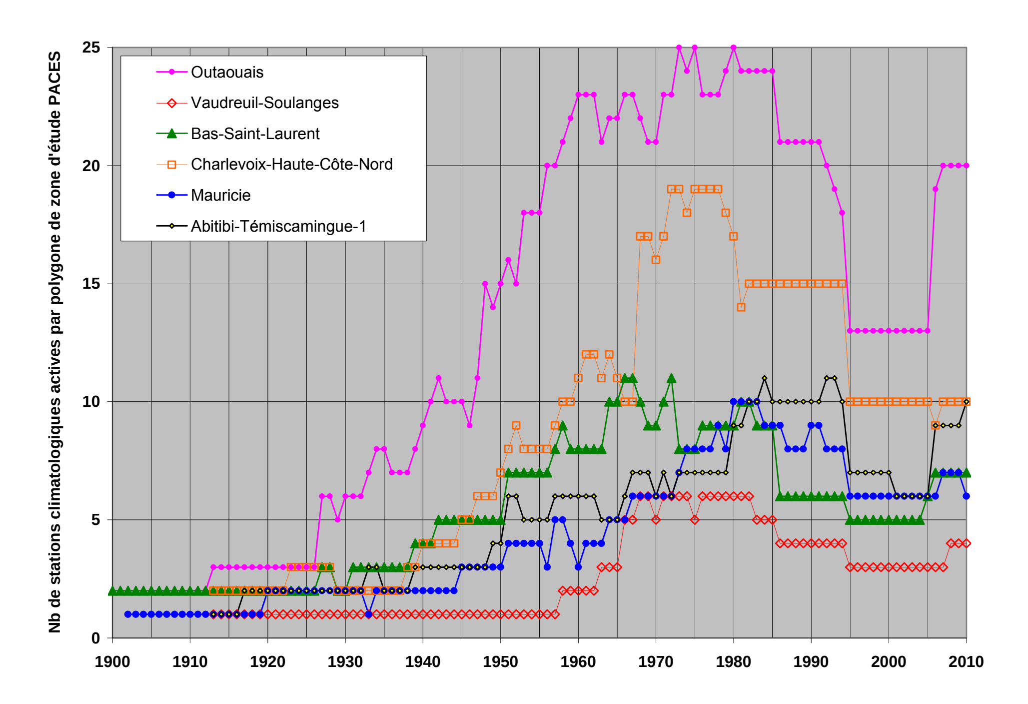


Figure 3 Nombre total de stations climatologiques disponibles par polygone de zone d'étude du PACES

On observe que certaines zones d'étude du PACES sont pourvues d'un plus grand nombre de stations que d'autres durant l'historique 1900-2010, mais il est important de se rappeler que chaque polygone de zone d'étude du PACES est d'une superficie distincte. Conséquemment, il apparaît a priori préférable d'étudier plutôt la densité de l'instrumentation en fonction du temps, notamment par l'analyse du rapport de la superficie de zone d'étude par station climatologique active. Toutefois, les figures de l'annexe 6 illustrent que la distribution des stations climatologiques n'est pas uniforme au sein de ces polygones, de sorte que l'usage d'un tel ratio mène systématiquement à une surévaluation de la densité de l'instrumentation, laquelle sera plus ou moins prononcée selon que la distribution des stations sera respectivement peu ou fortement uniforme sur le polygone de chaque zone d'étude. Au-delà de ce constat, les figures 3 et 4 indiquent qu'à partir de 1950, plusieurs zones du PACES deviennent instrumentées d'un effectif de stations climatologiques qui sera par la suite égal ou supérieur jusqu'en 2010 (exception faite des zones d'étude du PACES Vaudreuil-Soulanges, Charlevoix et Haute-Côte-Nord, Mauricie, Bécancour, Montérégie-Est et Nicolet et Saint-François, pour lesquelles l'effectif ne fait que s'accroître au-delà de 1950).

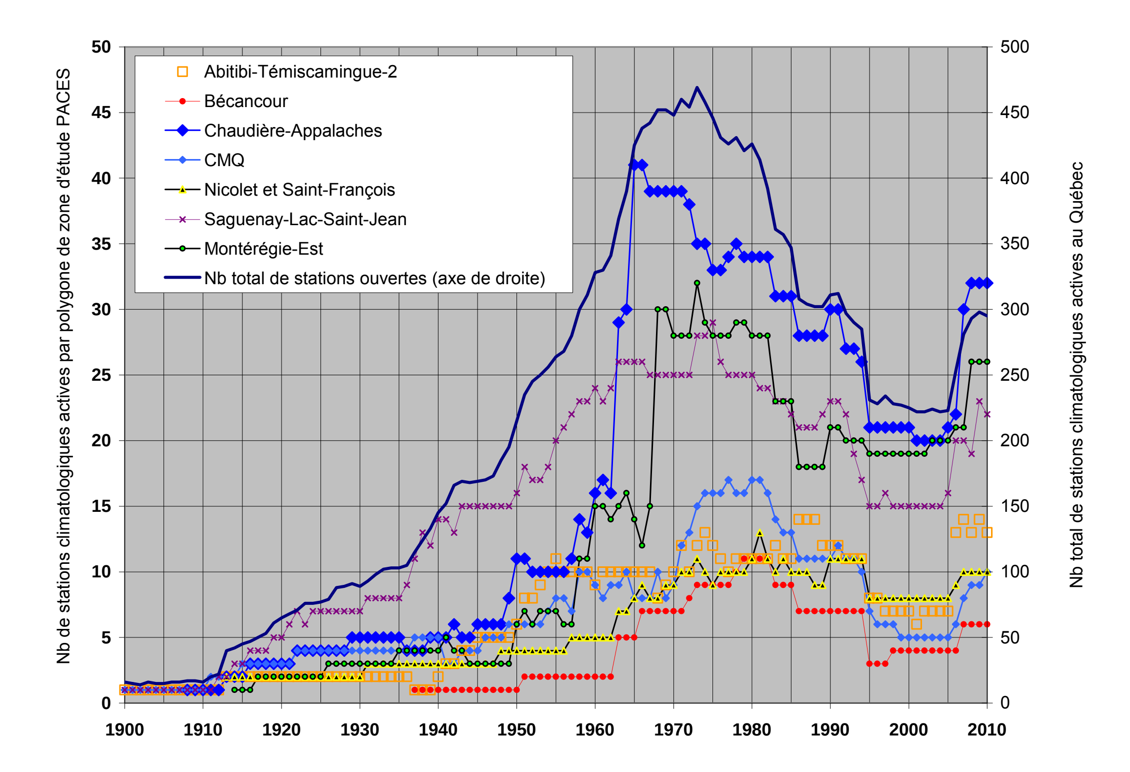


Figure 4 Nombre total de stations climatologiques disponibles par polygone de zone d'étude du PACES et nombre total de stations climatologiques disponibles

4.1.1.1 Singularité du 31 octobre 1976

Le 31 octobre 1976, les données conservées sont passées de quotidiennes à biquotidiennes et les observations de cette journée ont été perdues. Pour cette raison, les Tmin du 31 octobre 1976 sont manquantes. De plus, les autres données (Tmax et P) ont le statut de donnée incomplète (*valeur calculée avec seulement une partie des données normalement nécessaires,* MDDELCC, DSÉE-SIMAT) pour cette journée. Afin de ne pas causer d'impact chez les équipes du PACES ainsi que sur les projets opérationnels au CEHQ (calages de modèles hydrologiques), il a été décidé de modifier les données à la source. Ainsi, les données de températures (Tmin et Tmax) du 31 octobre 1976 ont été obtenues en faisant la moyenne du 1er novembre et du 30 octobre, et les précipitations ont été mises à zéro.

4.1.2 Données nivométriques

La section 3.2.4 a présenté une analyse de l'effectif, de la distribution spatiale ainsi que du nombre de relevés historiques des stations nivométriques, avec les conséquences induites sur la précision du krigeage des erreurs du modèle de neige (ÉEN et HdeN).

Pour en savoir davantage sur la méthodologie et l'instrumentation employées pour la collecte des données nivométriques, le lecteur peut se référer au manuel d'instruction à l'usage des observateurs en nivométrie produit par le SIMAT (MDDEP, 2008).

En ce qui concerne la qualité des données nivométriques, on peut entretenir un doute raisonnable sur la fiabilité des relevés nivométriques les plus anciens de l'historique, dans la mesure où les procédures de saisie n'étaient peut-être pas aussi éprouvées et documentées à l'époque qu'elles le sont devenues au fil du temps.

4.2 Analyse spatiale

Pour un type de variable donné (Tmin, Tmax, P, ÉEN calculé ou AV), il serait souhaitable d'analyser la distribution spatiale des données aux 24 000 points de grille du domaine d'application (réf. section 3), et ce, tout au long de l'historique au plus fin pas de temps qui soit, c'est-à-dire une journée. Cet exercice vise à déceler la présence potentielle d'erreurs dans la distribution spatiale des données. Par erreur, on fait référence ici à une distribution spatiale de données (Tmin, Tmax, P, ÉEN calculé ou AV) qui ne serait pas vraisemblable pour un analyste. Ces erreurs peuvent survenir principalement :

- Lors de l'utilisation de certaines données sources erronées (Tmin, Tmax, P, relevés nivométriques);
- Lors de l'étape des calculs produits par les algorithmes employés, ce qui inclut :
  - l'étape d'interpolation spatiale des données de Tmin, Tmax et P,
  - l'étape d'interpolation spatiale des deux types d'erreurs du modèle de neige (ÉEN et HdeN),

D'importants efforts sont déployés par la DSÉE (SIMAT) pour surveiller la qualité des données sources employées. Lors des travaux du présent projet, la DEH du CEHQ a contribué à ces efforts en cernant notamment certaines données suspectes, lesquelles ont été soumises au SIMAT. Pour complémenter ces efforts, des analyses de validation des grilles des données d'entrée et des données produites sont menées.

La méthodologie retenue pour ce faire consiste à visionner, pour les variables P, Tmin, Tmax, ÉEN calculé et AV, les grilles de données journalières pour les 111 années de la période couverte. En détail, les grilles de données sont d'abord portées en cartes avec une échelle graduée de couleurs. Puis, à partir des cartes, un film (JPEG animé) est

produit pour chaque variable, en spécifiant une cadence rapide de défilement (environ 6 cartes/seconde). Le visionnement de chacun de ces films dure un peu moins de deux heures pour chaque variable (Tmin, Tmax, P, AV et ÉEN calculé). Si un analyste attitré au visionnement suspecte la présence d'une erreur, il est en mesure de faire une pause au visionnement, puis de repasser la séquence suspecte des cartes en notant au besoin certaines observations ou certains commentaires.

Le travail des analystes attitrés au visionnement s'est fait en tenant compte d'évidences propres au domaine de la météorologie. Il est normal d'observer une distribution hétérogène des données climatiques dans l'espace, particulièrement dans le cas de la précipitation et des variables qui en sont dépendantes (ÉEN, HdeN et AV). Dans le cas d'un événement météorologique important (accumulations substantielles de P) ou intense (fortes valeurs de P tombées en peu de temps), il n'est pas rare d'observer une distribution spatiale de P fortement hétérogène, caractérisée par un fort gradient variant sur une courte distance entre les zones ayant reçu des précipitations et celles environnantes peu ou pas influencées par l'événement météorologique. Face à cette réalité, la tâche des analystes a principalement consisté à repérer des distributions spatiales anormales (non vraisemblables), comme une grille entièrement remplie d'une valeur constante non nulle et des distributions spatio-temporelles anormales, tel un jeu de grilles successives marqué par l'omniprésence d'une zone de valeurs quasi constantes (signature typique d'une station de mesures défectueuse ou d'un problème avec les algorithmes de calculs).

Cette analyse spatiale des données a permis de relever certaines erreurs se produisant dans des conditions particulières, et de les corriger. En guise d'exemples, les figures 5 et 6 suivantes présentent la distribution spatiale de la précipitation telle qu'interpolée sur le domaine avant et pendant le passage de la queue de la tempête tropicale Katrina à la fin du mois d'août 2005.

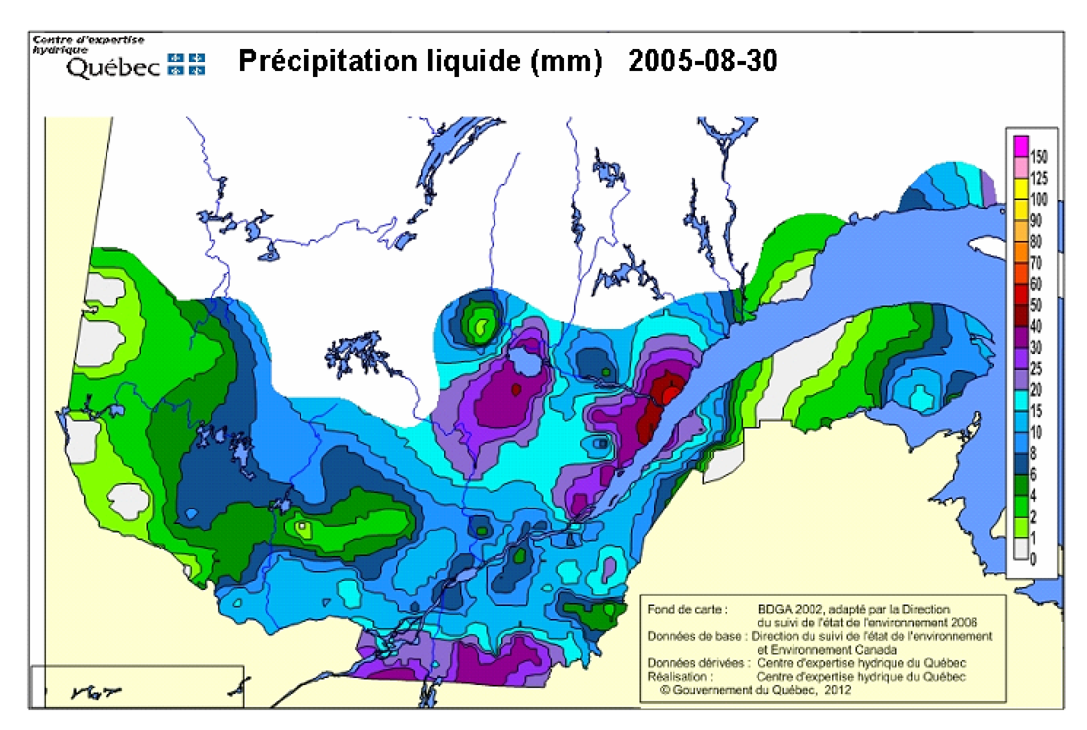


Figure 5 Précipitation interpolée le 30 août 2005

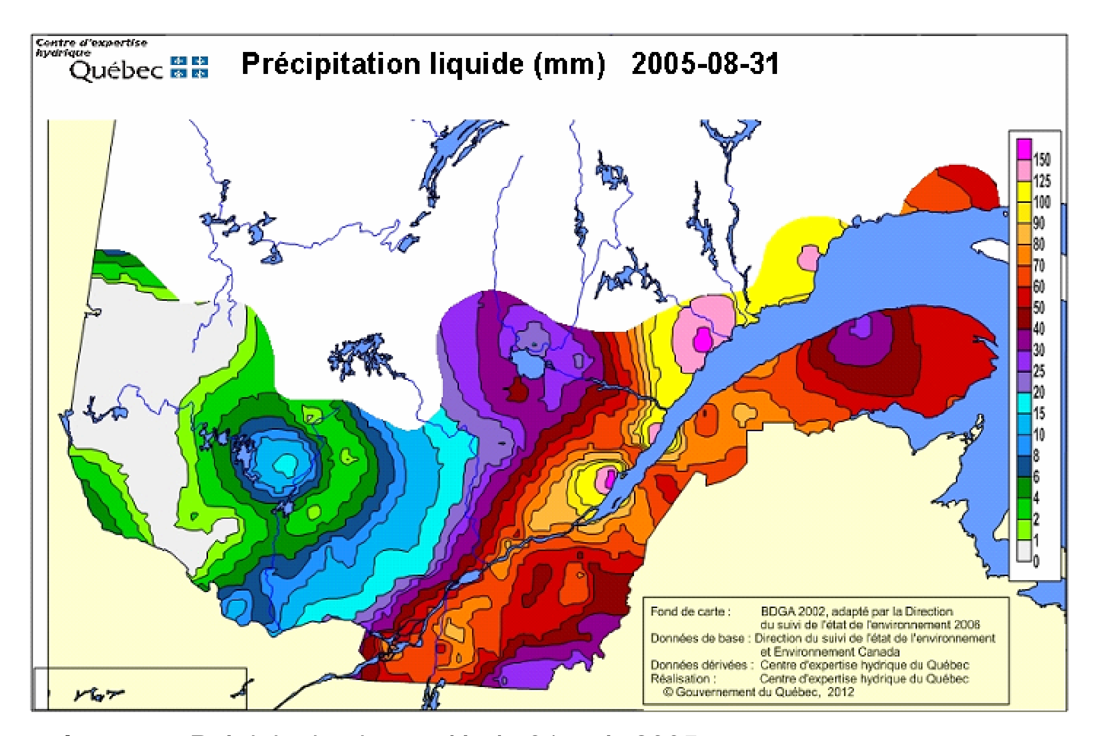


Figure 6 Précipitation interpolée le 31 août 2005

Le 30 août 2005, on observe que l'interpolation gère bien la présence du lac Saint-Jean et du fleuve pour des zones de précipitation ressenties par des stations climatologiques

de chaque côté du lac et du fleuve, respectivement. Dans l'extrême sud de la carte de la figure 5, on observe une certaine accumulation de précipitation associée à l'approche de la tempête tropicale Katrina. La figure 6 montre que la trajectoire de la tempête tropicale Katrina a suivi l'axe du fleuve Saint-Laurent lors de son passage sur le Québec le 31 août 2005.

4.3 Analyse temporelle

Il importe d'assurer un contrôle de qualité des variations temporelles des données d'AV et de leurs données sources (P, Tmin, Tmax et ÉEN saisies des relevés nivométriques), principalement pour vérifier que ces données varient de façon aléatoire et vraisemblable dans le temps. Compte tenu des remarques énoncées au début de la section 4.1, la présente section doit néanmoins se limiter à analyser qualitativement ces séries de données pour tenter d'avoir une première idée de leur validité.

Pour rattacher cette analyse qualitative (visuelle) à des critères concrets, certaines observations de cette section sont parfois présentées en lien avec des caractéristiques du critère de stationnarité (absence de sauts, cycles ou tendances) qu'elles semblent ou non respecter. Pour ce faire, en certains points de l'espace du domaine d'application, on procède à une analyse graphique interannuelle des valeurs mensuelles en vue de déceler la présence de sauts, cycles ou tendances. À partir de cette analyse partielle qualitative à ces points, on se questionne ensuite à savoir si les comportements décelés sont conformes aux comportements anticipés. En aucun cas toutefois, il ne faudrait considérer les analyses effectuées comme des analyses de tendances. Les analyses ne visent qu'à détecter des erreurs potentielles.

4.3.1 Températures

Dix points de grilles sont d'abord sélectionnés de manière à couvrir minimalement diverses régions composant le Québec méridional, ce qui inclut les régions à l'étude dans le cadre du PACES en date de janvier 2012. Le tableau 1 présente les coordonnées des dix points de grille témoins choisis. L'analyse de la section 4 a donc été réalisée alors que les zones d'étude n'étaient pas encore déterminées pour le troisième appel du PACES, ce qui explique qu'aucun point de grille témoin n'est attribué précisément à ces zones au tableau 1.

Tableau 1 : Points de grille témoins pour l'analyse des séries temporelles

Point de grille	Région du point de grille	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Abitibi-Témiscamingue	48,4	-78,0	300,0
2	Outaouais	45,9	-76,1	183,3
3	Mauricie	46,5	-72,9	178,9
4	Communauté métropolitaine de Québec (CMQ)	47,0	-71,3	372,1
5	Saguenay–Lac-Saint-Jean	48,4	-72,0	200,1
6	Centre-du-Québec	46,3	-72,0	106,3
7	Montérégie-Est	45,4	-72,8	96,1
8	Côte-Nord	49,5	-68,7	394,6
9	Bas-Saint-Laurent	48,3	-68,5	159,0
10	Gaspésie	48,7	-65,3	581,1

La figure 7 porte en cartes ces mêmes points ainsi que les régions à l'étude dans le cadre du PACES en date de janvier 2012.

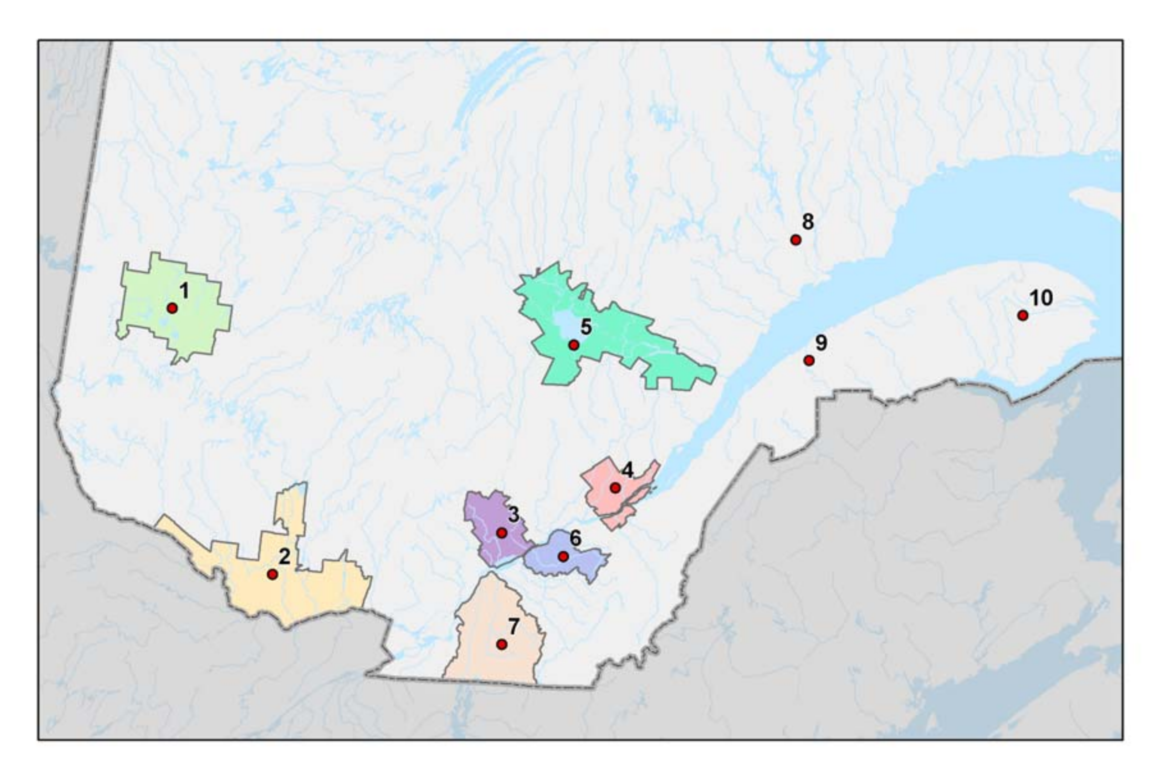


Figure 7 Localisation des dix points de grille témoins (tableau 1) et des limites des zones d'étude du PACES en date de janvier 2012

Ensuite, pour chacun de ces points de grille témoins, à partir des historiques de données journalières interpolées pour Tmin et Tmax, on produit un graphique affichant la variation interannuelle des médianes de Tmin et de Tmax pour chaque mois d'une année. Cent vingt (120 = 10 points x 12 mois) graphiques sont ainsi produits.

La figure 8 présente un exemple d'un tel graphique, lequel permet de suivre l'évolution des valeurs médianes de Tmin et de Tmax pour l'échantillon 1900-2010 pour le mois de février, au point de grille témoin n° 4 situé sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec.

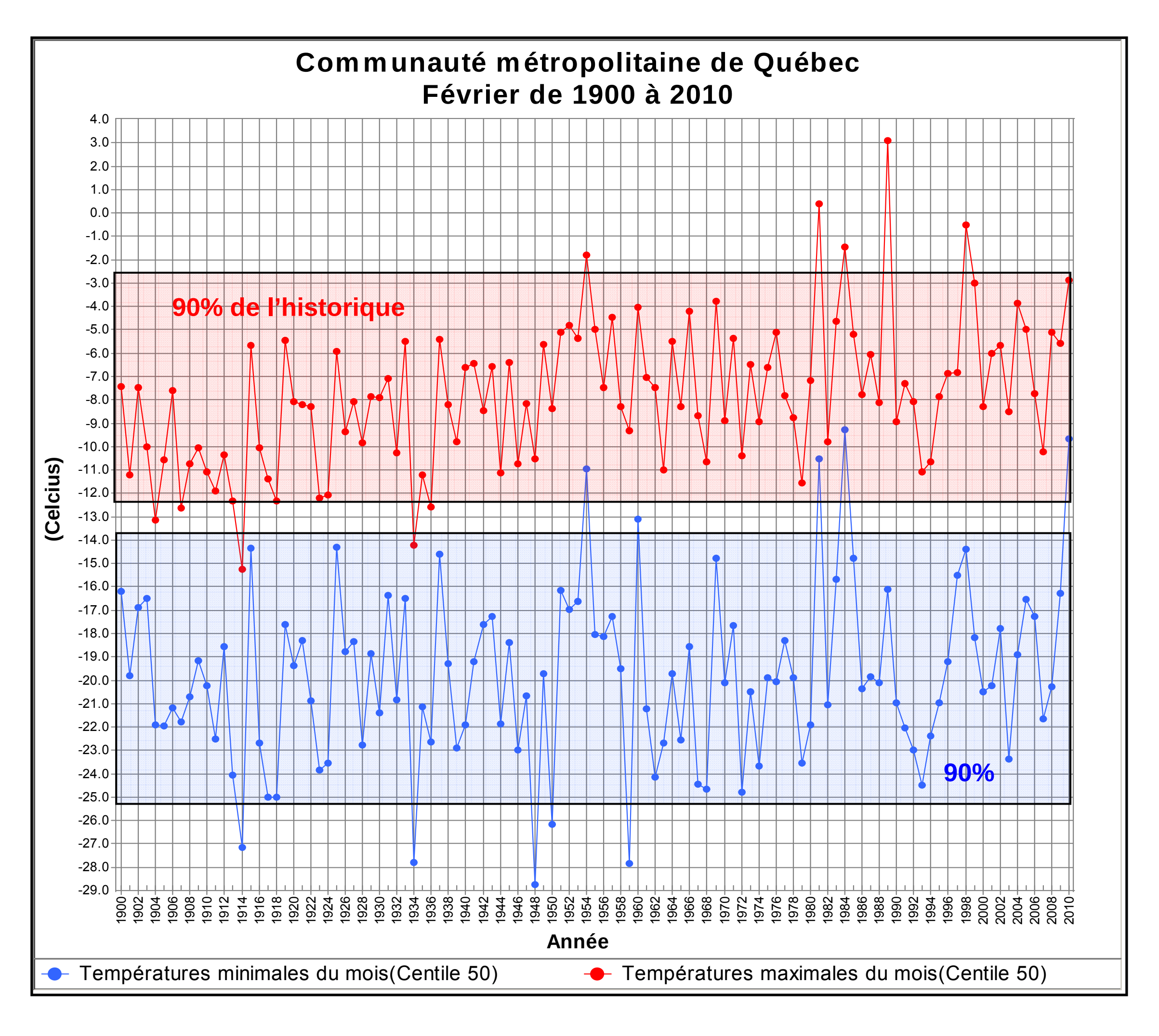


Figure 8 Variation interannuelle des données médianes mensuelles de Tmin et de Tmax pour le mois de février, au point de grille témoin n° 4 (tableau 1)

La figure 9 présente un autre exemple de l'évolution des valeurs médianes de Tmin et de Tmax pour l'échantillon 1900-2010 pour le mois d'août, au point de grille témoin n° 2 situé en Outaouais.

Pour les dix points de grille témoins répartis sur la grille du Québec méridional (figure 7), une analyse préliminaire des variations interannuelles des données médianes mensuelles de Tmin et de Tmax (figures 8 et 9) suggère l'absence de sauts et de cycles. En ce qui a trait à la présence de tendances, parmi les dix points de grille témoins, on note parfois la présence plus fréquente de valeurs élevées à partir du milieu du siècle dernier. La figure 8 semble représenter un tel cas.

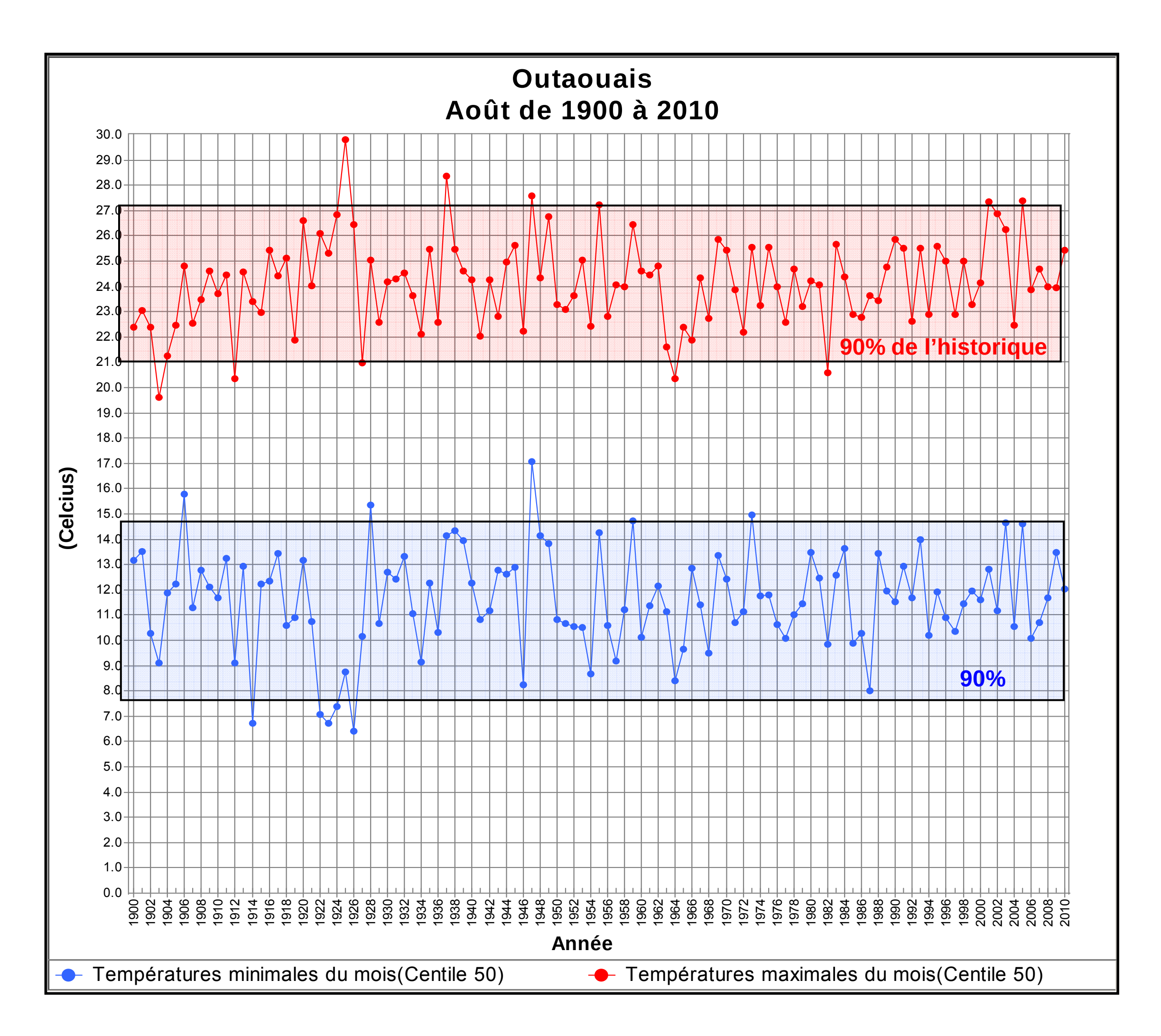


Figure 9 Variation interannuelle des données médianes mensuelles de Tmin et de Tmax pour le mois d'août, au point de grille témoin n° 2 (tableau 1).

A priori, l'hypothèse de l'influence des changements climatiques apparaît la plus plausible pour expliquer cette observation. Ceci étant dit, il faut néanmoins être très prudent avec cette hypothèse. D'une part, rappelons les limites de la présente analyse, laquelle est menée sur des données non homogénéisées. D'autre part, notons que l'observation précitée est plus ou moins claire dépendamment du mois, de la région propre au point de grille ainsi que de la variable (Tmin ou Tmax). À titre d'exemple, des points de grille témoins situés plus au nord (à l'échelle du Québec méridional), notamment ceux de la Côte-Nord et de la Gaspésie (tableau 1 et figure 7), ne semblent pas touchés par cette observation durant les mois d'hiver, alors que cela semble être le cas à d'autres points de grille témoins également situés à des latitudes élevées à l'échelle du Québec méridional (p. ex., Tmin du point de grille témoin n° 1 situé en Abitibi-Témiscamingue). Par ailleurs, la figure 9 montre bien que, pour certains points de grille lors de certains mois, aucune tendance particulière n'est observable. Ces résultats semblent cohérents avec les résultats de Yagouti et coll. (2006) qui ont illustré la grande disparité dans les tendances de températures selon les sites et les périodes de l'année analysés.

Sur la base de sa connaissance des instruments de mesure et des procédures employées sur son réseau de stations climatologiques, la DSÉE (SIMAT) est par ailleurs en mesure d'avancer d'autres hypothèses que celle des changements climatiques pour expliquer l'observation précitée. À titre d'exemple, au cours des 111 dernières années, les modifications survenues aux sites des stations (p. ex., déplacements d'une station et évolution de l'environnement avoisinant une station donnée) ainsi que les changements de certains instruments de mesure ou de certaines méthodes de collecte de données peuvent avoir induit une influence anthropique non négligeable dans la mesure d'une variable climatologique (Yagouti et coll., 2006).

En somme, les commentaires de la présente section font état de la grande variabilité des distributions spatiale et temporelle des Tmin et des Tmax lorsque l'on travaille à l'échelle mensuelle et interannuelle. On peut considérer qu'il est normal, voire rassurant, d'observer à <u>certains</u> points de grille ciblés pour le PACES, pour <u>certains</u> mois, une augmentation de la fréquence des valeurs élevées de Tmin et de Tmax depuis le milieu du siècle dernier, comme il a été abondamment rapporté dans la littérature scientifique au cours des dernières années. Il n'y a donc pas de signe évident de non-vraisemblance des données de températures.

4.3.2 *Précipitations, équivalents en eau de la neige et apports verticaux*

La méthodologie d'analyse graphique des valeurs médianes présentées en 4.3.1 a été reprise et appliquée aux données sources de P ainsi qu'aux variables calculées (ÉEN et AV calculés journellement). Pour les mois d'octobre à juin (les mois où l'enneigement est jugé non négligeable à au moins un des dix points de grille témoins), on a superposé les valeurs médianes de P, de l'ÉEN calculé et des AV sur chaque graphique. Pour les autres mois, on a porté en graphique seulement les valeurs médianes de P. Cent vingt (120 = 10 points x 12 mois) graphiques ont ainsi été produits. La figure 10 présente un exemple d'un tel graphique pour le mois d'avril.

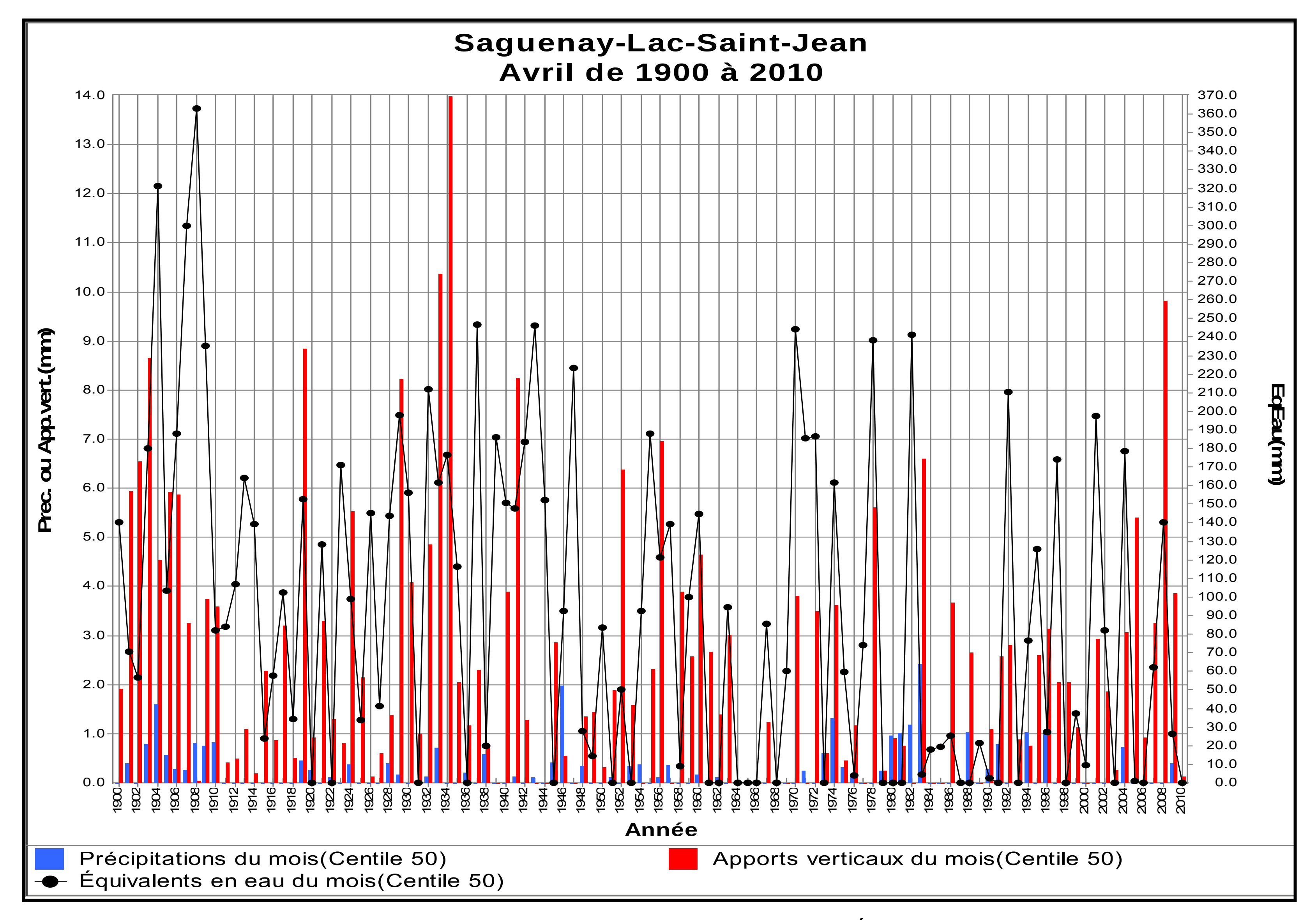


Figure 10 Variation interannuelle des données médianes mensuelles de P, de l'ÉEN calculé et d'AV en avril, au point de grille témoin n° 5 (région du Saguenay–Lac-Saint-Jean – tableau 1)

À la figure 10, une analyse qualitative préliminaire suggère une stationnarité dans la distribution des données médianes de P, d'AV et d'ÉEN calculés.

On a également produit des graphiques superposant la variation interannuelle des cumuls mensuels de P et d'AV à la variation interannuelle des valeurs maximums mensuelles de l'ÉEN calculé. Cela a été fait pour les mois d'octobre à juin (les mois où l'enneigement est jugé non négligeable à au moins un des dix points de grille témoins). Pour les autres mois, on a porté en graphique seulement les cumuls mensuels de P. Cent vingt graphiques ont ainsi été produits. La figure 11 présente un exemple d'un tel graphique pour le même cas de figure que celui choisi pour la figure 10 (point de grille témoin n° 5, mois d'avril).

Pour la figure 11, une analyse qualitative préliminaire suggère une stationnarité dans la distribution des données médianes de P, d'AV et d'ÉEN calculés. Par ailleurs, l'hiver fort enneigé de 2008 ressort bien sur cette figure. Le couvert nival total de cet hiver-là a été classé exceptionnellement fort dans plusieurs régions du Québec, et le point de grille témoin n° 5 situé près du lac Saint-Jean n'y fait pas exception, selon la reconstitution des ÉEN calculés journellement (ÉEN maximum de 302 mm). À titre anecdotique, la figure 11 montre en effet que, sur les 111 années de la période reconstituée, seuls les mois d'avril des années 1904, 1907, 1908, 1909 et 1972 présentent des valeurs d'ÉEN maximum pour le mois d'avril supérieures ou égales à 302 mm. Comme mentionné à la section 4.2, il faut néanmoins noter que les valeurs de l'ÉEN calculé avant 1949 sont susceptibles d'être moins précises. Autre observation d'intérêt, les AV d'avril 2008 s'avèrent les plus forts de tout l'historique reconstitué, à près de 400 mm.

La figure 12 superpose quant à elle les mêmes types d'information que ceux présentés à la figure 11, mais au point de grille témoin n° 7 (tableau 1). Une analyse qualitative préliminaire suggère l'absence de sauts ou de cycles dans la distribution des cumuls de valeurs de P et d'AV ainsi que des valeurs maximums mensuelles de l'ÉEN. Toutefois, cette même analyse préliminaire indique la présence d'une tendance baissière appréciable pour les cumuls de valeurs d'AV et les valeurs maximums mensuelles de l'ÉEN.

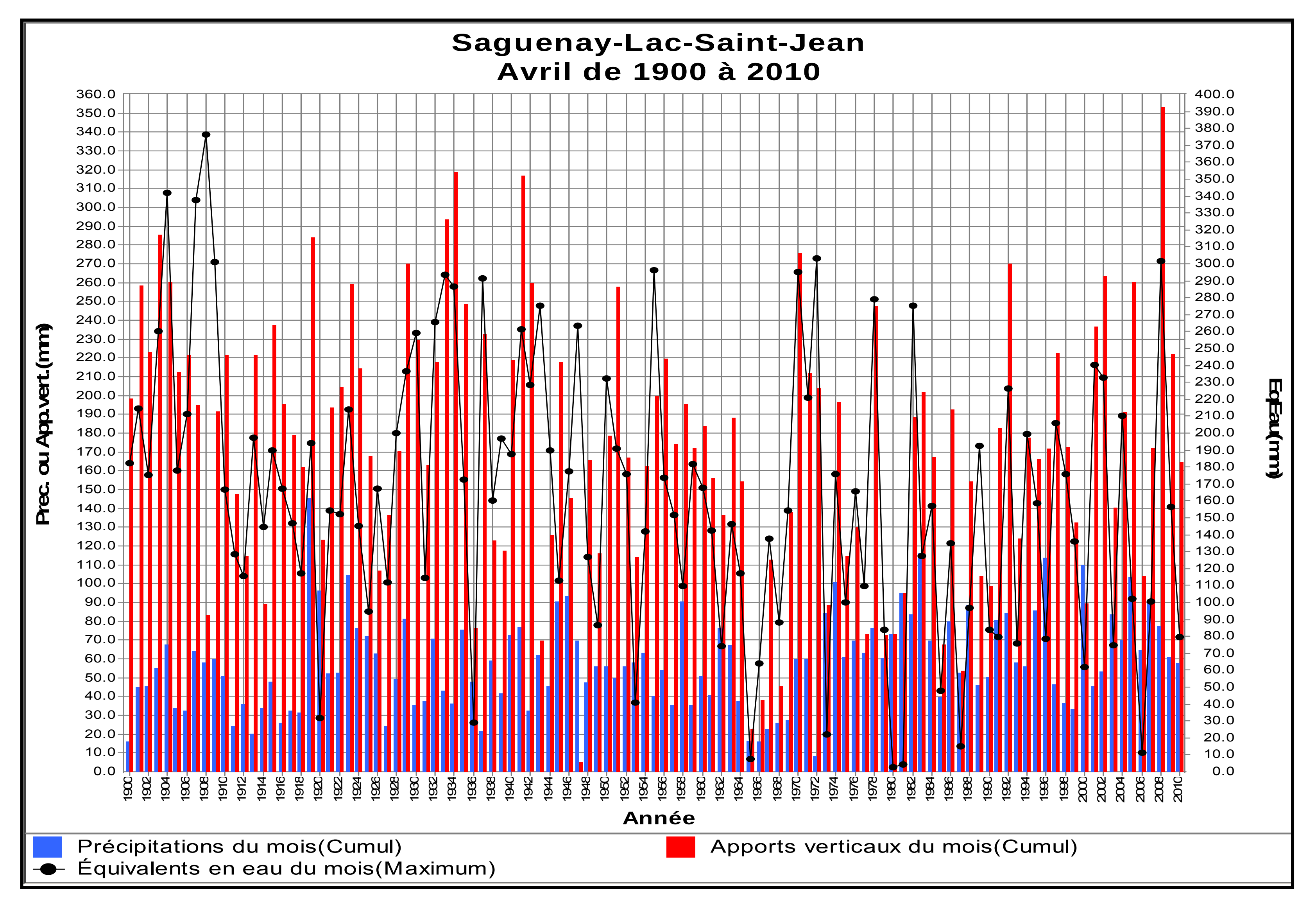


Figure 11 Variations interannuelles des cumuls mensuels de P et d'AV, auxquelles on a superposé la variation interannuelle des valeurs maximums mensuelles de l'ÉEN calculé, en avril au point de grille témoin n° 5 (tableau 1)

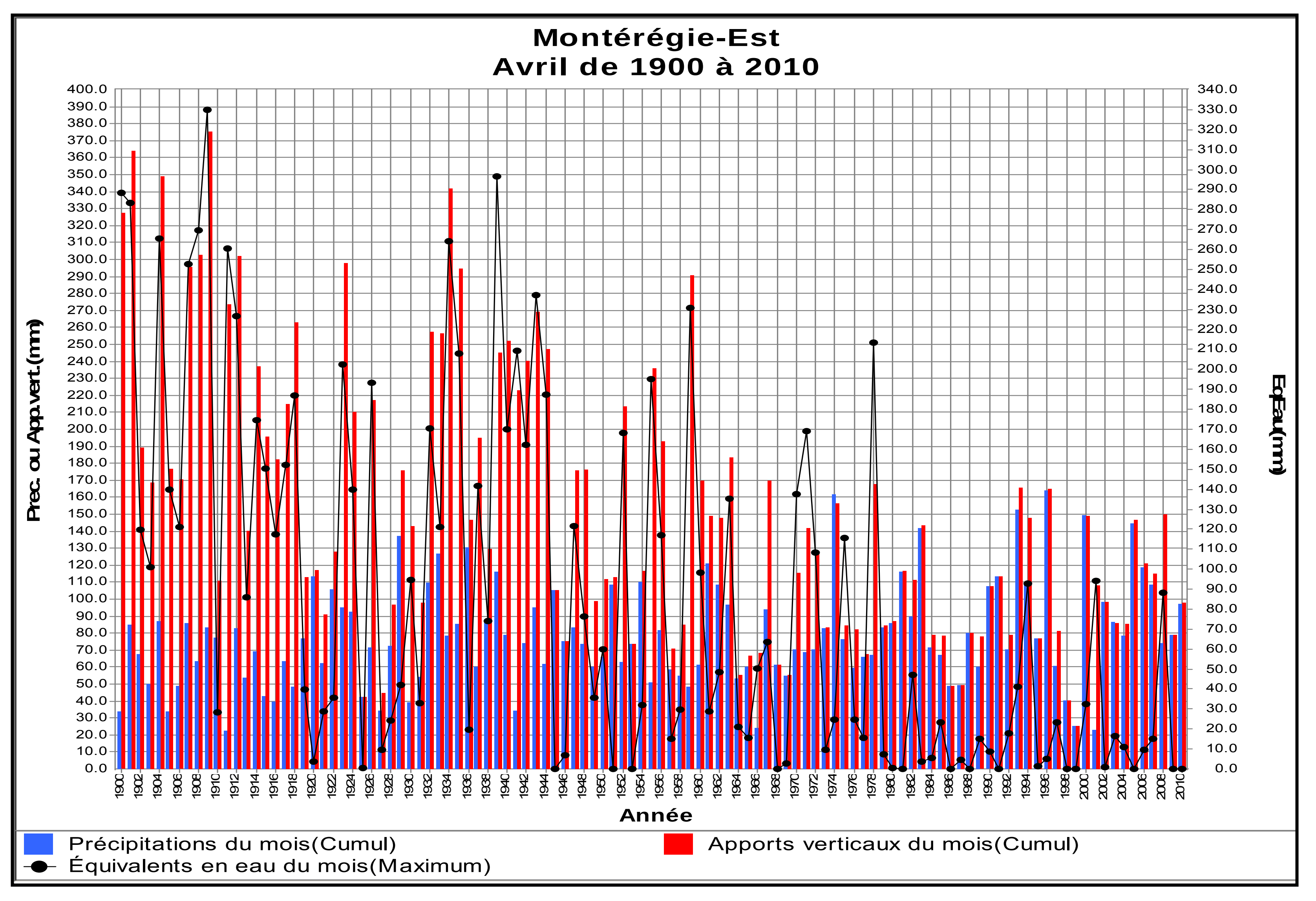


Figure 12 Variations interannuelles des cumuls mensuels de P et d'AV, auxquelles on a superposé la variation interannuelle des valeurs maximums mensuelles de l'ÉEN calculé, en avril au point de grille témoin n° 7 (tableau 1)

Pour expliquer une telle différence dans l'évolution des cumuls d'AV et des valeurs maximums mensuelles de l'ÉEN (figure 12 par rapport à figure 11), on peut à nouveau évoquer l'influence possible des changements climatiques, comme mentionné à la section 4.3.1 avec les nuances qui la composent.

En supposant que l'hypothèse de l'influence des changements climatiques soit valide, on peut souligner brièvement ici quelques-uns de leurs effets de façon informelle, avec quelques-unes des hypothèses s'y rattachant. Selon les récentes recherches menées au Québec (Ouranos, 2010), il en résulterait une augmentation des températures, rendant les hivers plus doux comparativement au début du siècle dernier. Il est probable que des températures hivernales moins froides favorisent davantage la chute de précipitations liquides que solides au cours de l'hiver dans la partie méridionale du Québec. Cela expliquerait pourquoi l'ÉEN maximum calculé pour avril depuis la fin du siècle dernier s'avère moindre qu'auparavant, surtout à partir de 1980 à première vue (figure 12). Des couverts de neige moins importants en avril (moins fortes valeurs de l'ÉEN maximum) généreraient de plus faibles volumes d'eaux de fonte, ce qui réduirait les AV cumulés en avril (figure 12). Dans les régions moins méridionales comme le Saguenay–Lac-Saint-Jean d'où est issu le point de grille témoin n° 5 (figure 11), l'augmentation des températures hivernales pourrait s'avérer insuffisante pour altérer de manière considérable la phase des précipitations tombant sur ce territoire. Selon cette seconde hypothèse, la proportion des précipitations tombant sous forme solide en hiver sous ces latitudes plus élevées serait peu ou non réduite. L'absence de tendances dans l'évolution de l'ÉEN maximum calculé au point de grille n° 5 (figure 11) suggère la validité de ces hypothèses.

Enfin, la figure 13 superpose les variations interannuelles des cumuls mensuels de P et d'AV au point de grille témoin n° 5 en juin. Cette figure démontre qu'en été les AV correspondent aux précipitations liquides. On remarque également la signature de l'événement météorologique exceptionnel ayant causé le déluge du Saguenay le 16 juin 1996. Cet événement a eu pour effet de porter le cumul mensuel à une amplitude de 350 mm, une valeur nettement supérieure aux autres valeurs de cumuls.

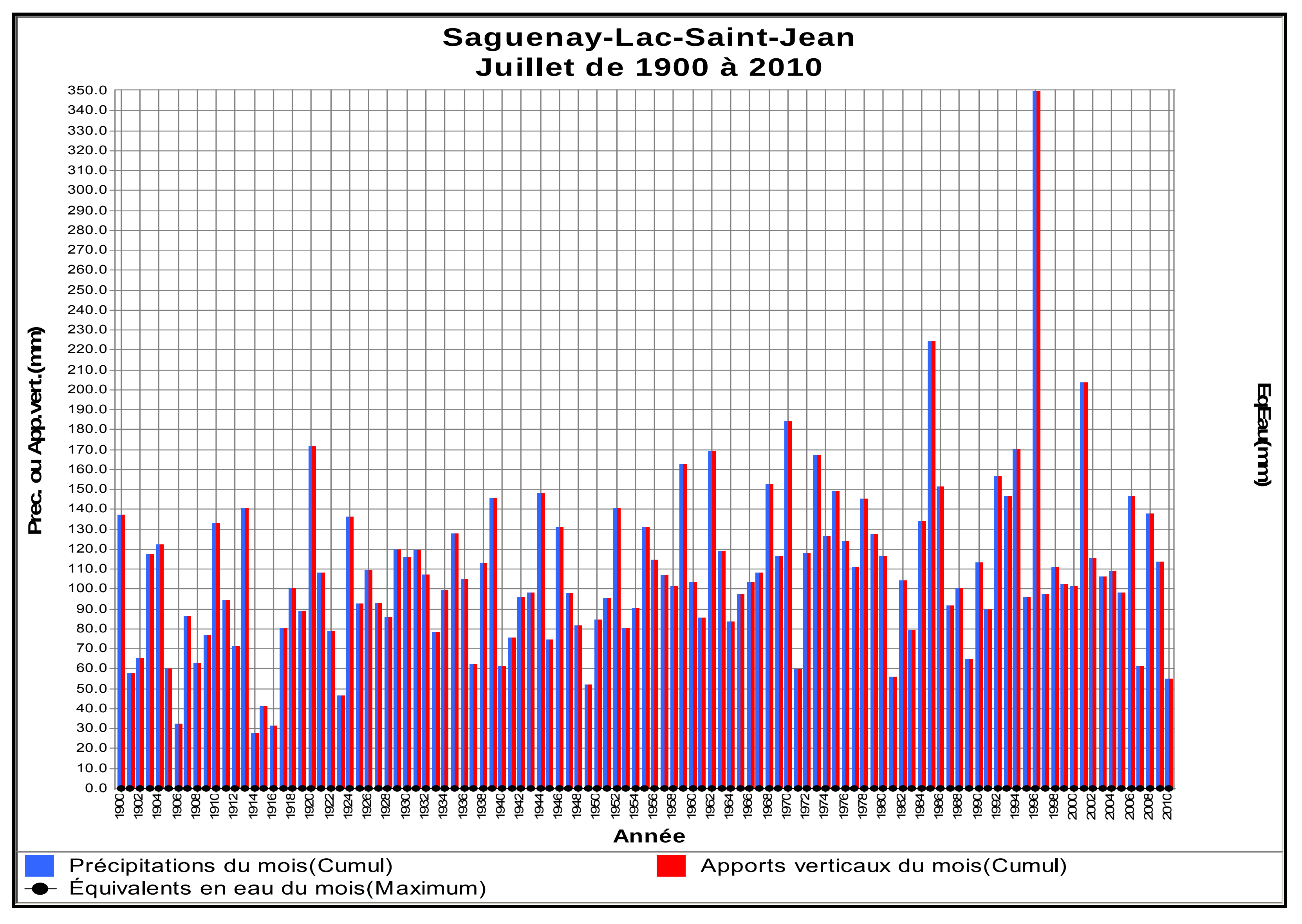


Figure 13 Variations interannuelles des cumuls mensuels de P et d'AV en juin au point de grille témoin n° 5 (tableau 1)

5 Conclusion et livrables

5.1 Conclusion

Une fois le domaine d'application défini à la section 2, la section 3 du rapport présente la méthode de krigeage employée pour interpoler les données climatiques sous-tendant les calculs d'AV. La section 3.2.4 présente une analyse de la précision relative du krigeage des valeurs de Tmin, de Tmax et de P, du krigeage des erreurs du modèle de neige (ÉEN et HdeN), ainsi que des AV calculés, le tout en référence aux zones d'étude du PACES. Pour les usagers hors PACES intéressés aux données d'AV à des sites du domaine situés à l'extérieur de ces zones d'étude, une analyse similaire à celle de la sous-section 3.2.4 a été menée que pour les variables Tmin et Tmax. Pour les autres variables, ces usagers peuvent employer l'approche présentée à cette sous-section pour estimer l'erreur relative du krigeage dans leur secteur d'intérêt sur le domaine.

Par la suite, la section 4 fournit des renseignements utiles relatifs à la qualité et la quantité des données climatiques (P, Tmin et Tmax) enregistrées par les instruments de mesure du réseau climatologique du MDDELCC. Cette section présente également des analyses spatiales et temporelles menées sur certaines variables krigées (P, Tmin et Tmax) et calculées (ÉEN et AV) à certains points de grille du domaine d'application, lesquels sont choisis pour couvrir minimalement l'étendue du domaine d'application.

5.2 Fichiers de données

Comme il est mentionné à la section 3.1, la grille définie pour couvrir le Québec méridional est composée de points espacés de 0,1 degré de latitude par 0,1 degré de longitude. Les grilles d'AV sont converties en séries temporelles et formatées dans des fichiers portant l'extension .AV. Chaque point de grille est identifié selon une syntaxe particulière qui définit sa localisation en coordonnées géographiques décimales. Par exemple, le fichier nommé « 729_465.av » contient la série d'apports verticaux du point de grille de longitude -72,9 et de latitude 46,5. Les données d'AV sont en millimètres d'eau.

6 Références

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 2007. *Manuel d'instructions à l'usage des observateurs en météorologie,* Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN : 978-2-550-52982-8 (PDF), 74 p. et 2 annexes. En ligne : http://www.MDDELCC.gouv.qc.ca/climat/surveillance/manuel-instruction-meteo.pdf

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 2008. *Manuel d'instructions à l'usage des observateurs en nivométrie*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN : 978-2-550-52028-3 (PDF), 32 p. En ligne : http://www.MDDELCC.gouv.qc.ca/climat/surveillance/manuel-instruction-nivo.pdf

Ouranos. 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques.* Rédaction : C. Desjarlais, A. Blondlot, M. Allard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve, Montréal, 128 p.

Sugiura, K., T. Ohata et D. Yang, D. 2006. « Catch Characteristics of Precipitation Gauges in Jigh-Latitude Regions with High Winds ». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 7, n° 5, p. 984-994.

Turcotte, R., T.-C. Fortier-Filion, P. Lacombe, V. Fortin, A. Roy et A. Royer. 2010. « Simulations hydrologiques des derniers jours de la crue printemps : le problème de la neige manquante ». *Journal des Sciences hydrologiques*, vol. 55, n° 6, p. 872-882.

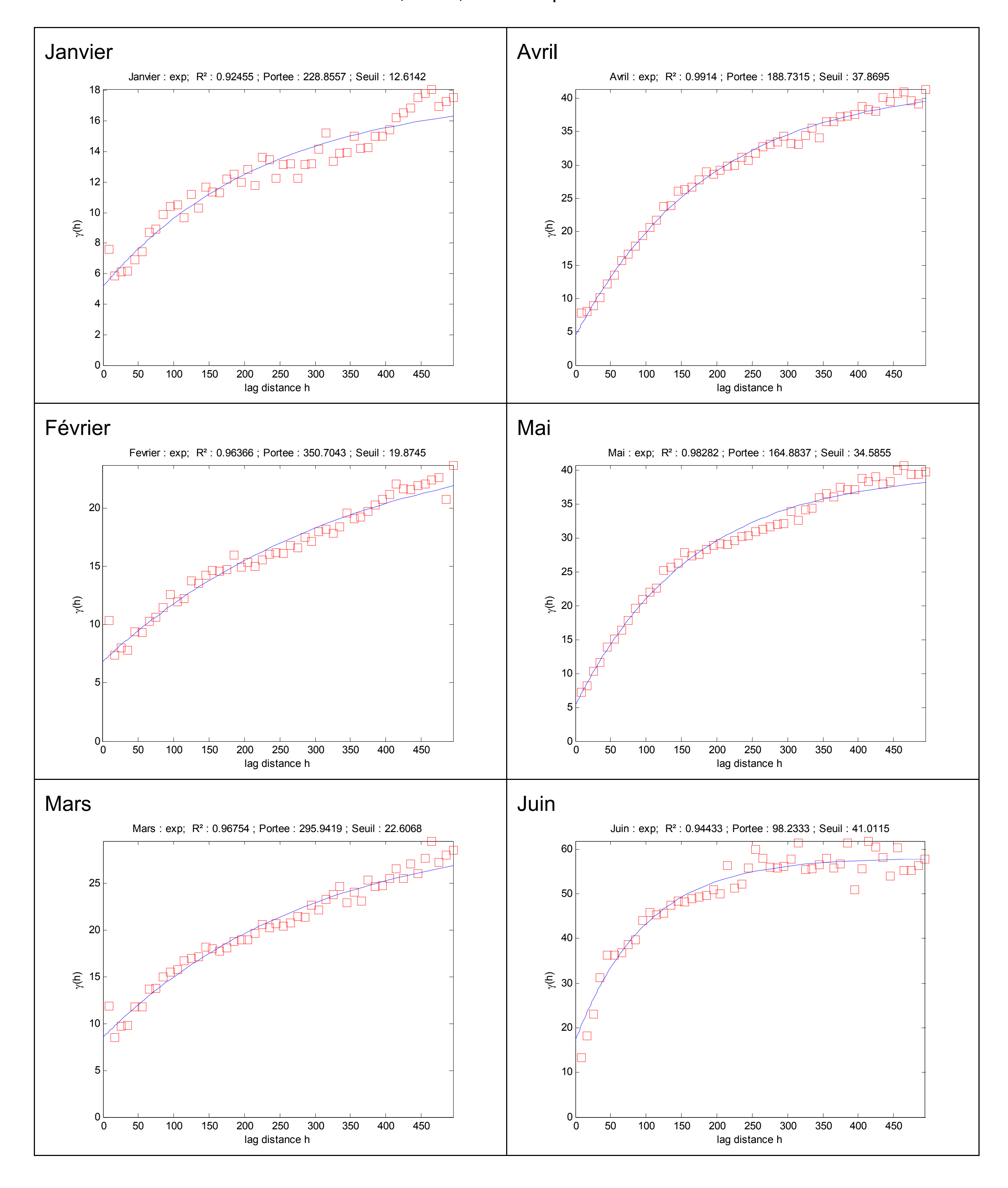
Turcotte, R., L.-G. Fortin, V. Fortin, J.-P. Fortin et J.-P. Villeneuve. 2007. « Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Québec, Canada ». *Nordic Hydrology*, vol. 38, n° 3, p. 211-234

Valery, A. 2008. Communications personnelles avec R. Turcotte dans le cadre des travaux de la thèse « Modélisation précipitations – débit sous influence nivale – Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants ».

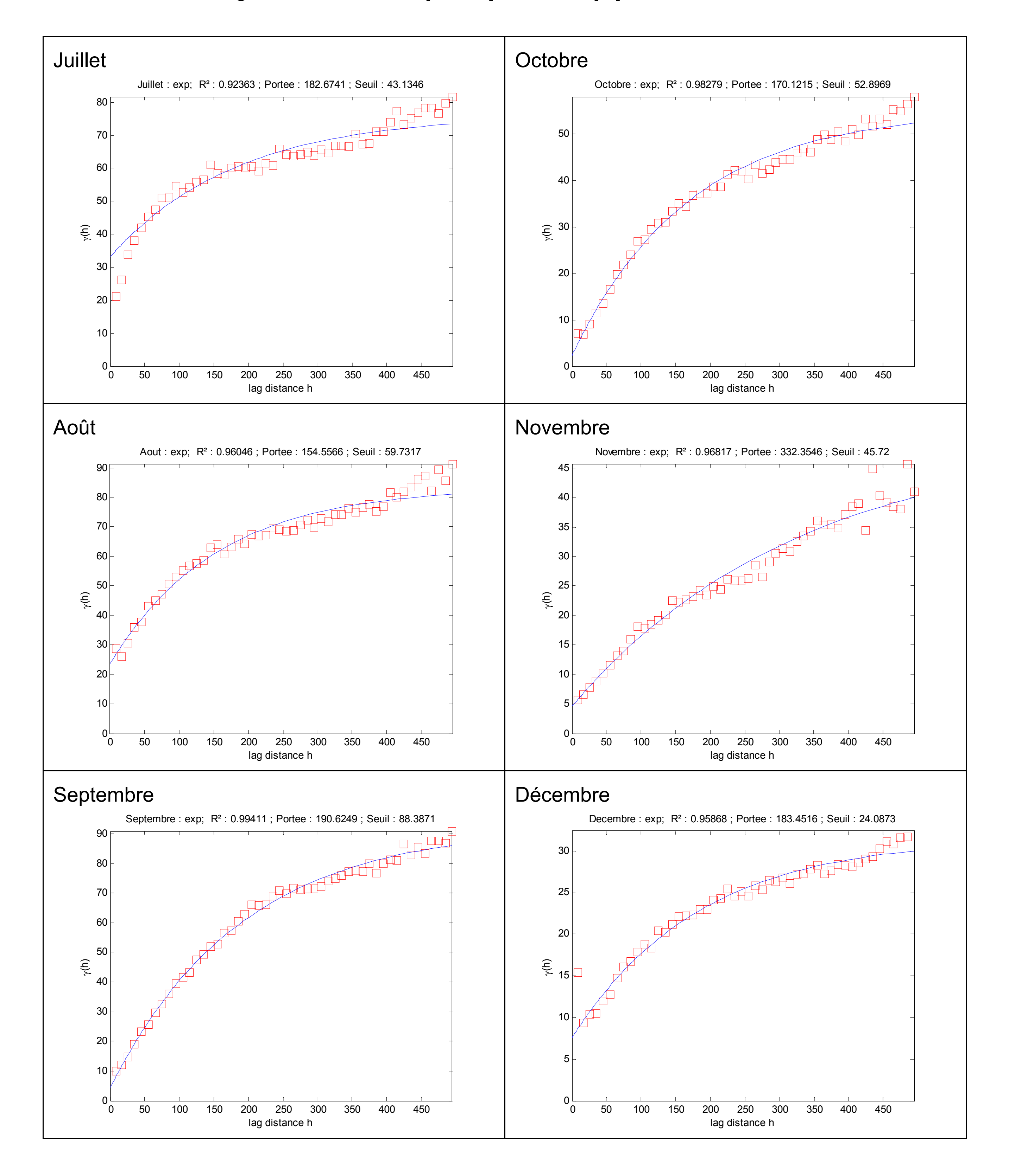
YAGOUTI, A., L. Vescovi et G. Boulet. 2006. « Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec méridional ». Rapport n° 4 d'Ouranos, Montréal (Canada), 140 p. En ligne : http://www.ouranos.ca/media/publication/8_Homogeneisation.pdf

Annexe 1 : Semi-variogrammes de la précipitation (P)

Rayon d'étude imposé : 500 km.
Valeurs de P considérées : P > 0,5 mm; forme exponentielle.

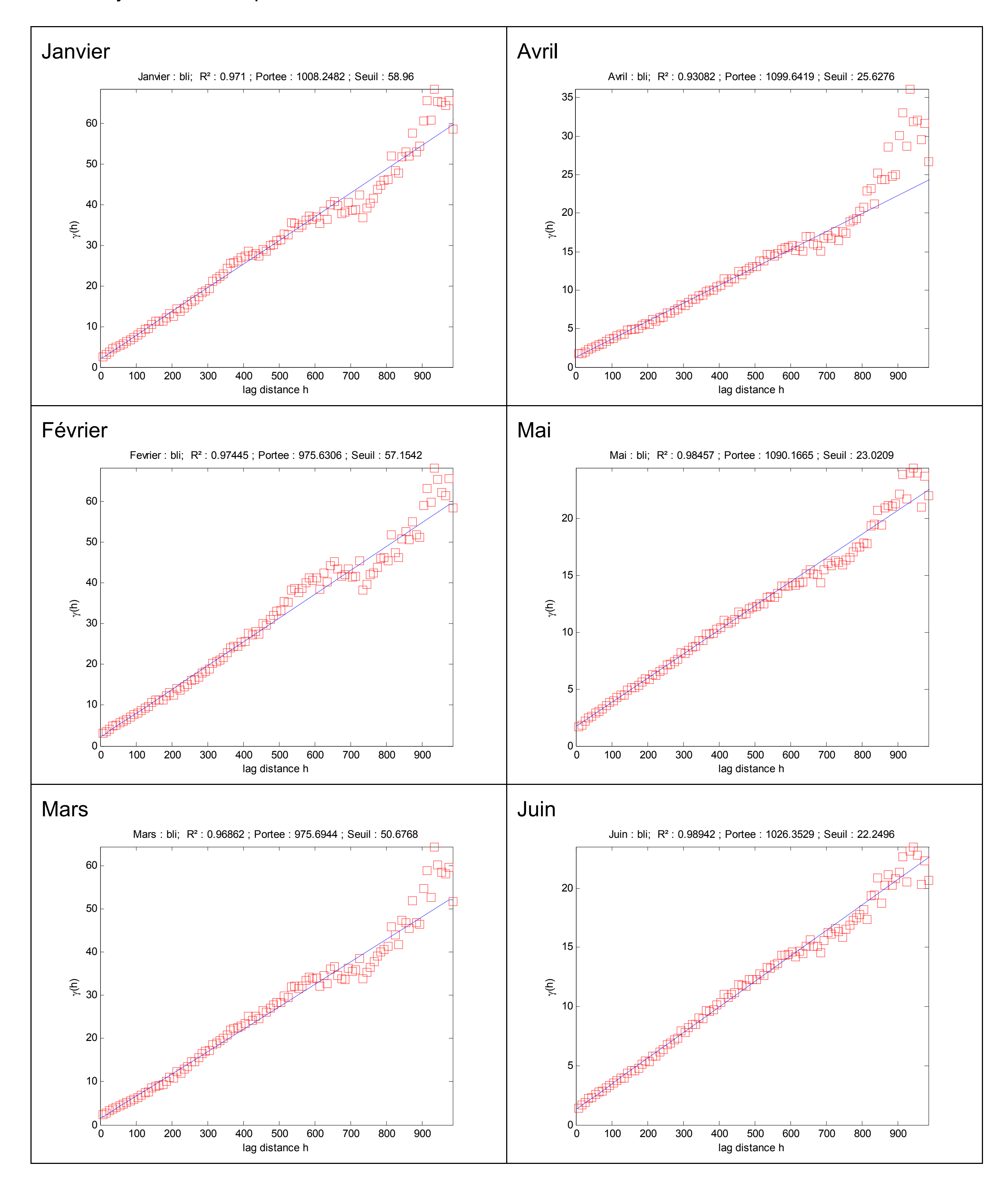


Semi-variogrammes de la précipitation (P) – suite

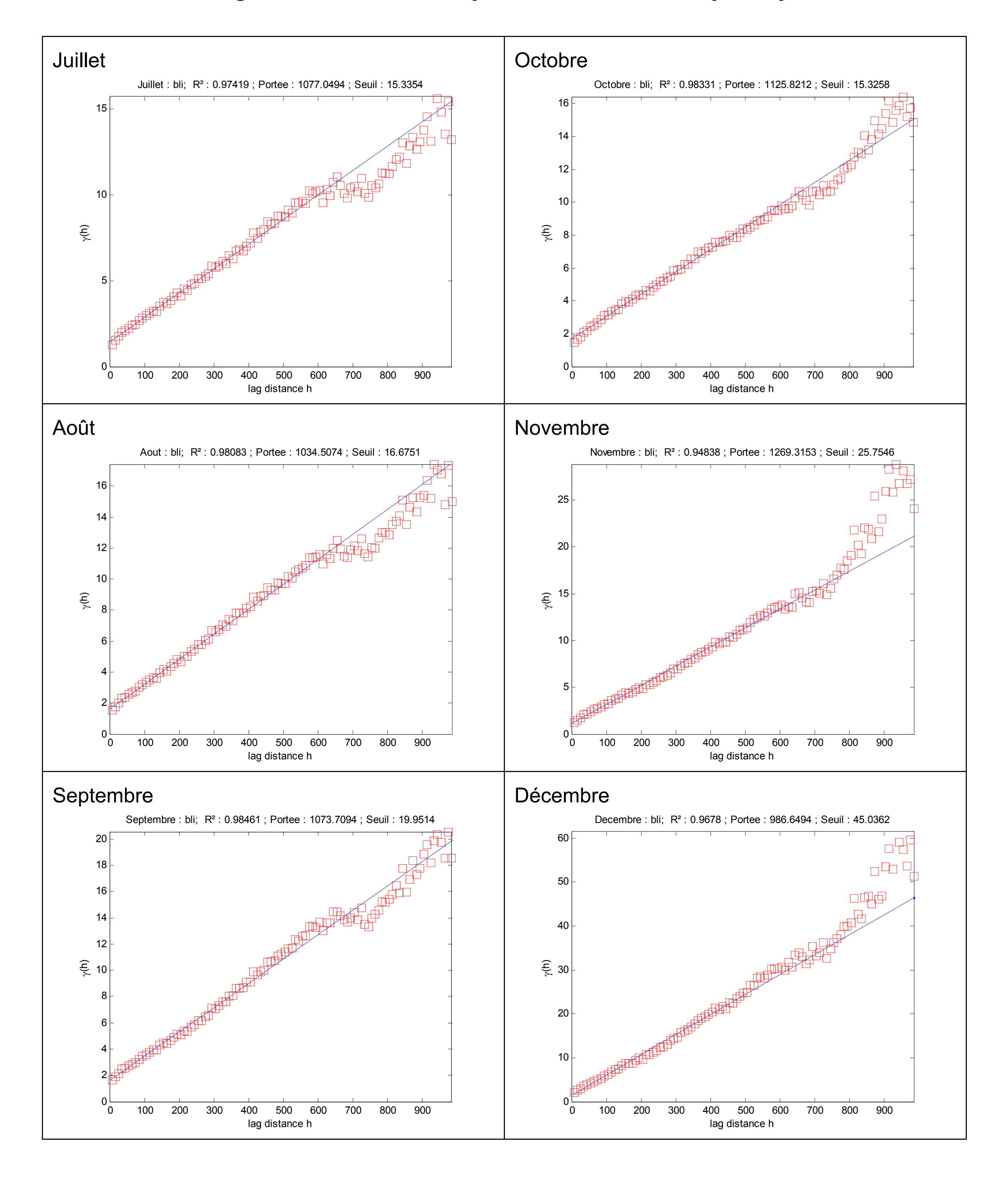


Annexe 2 : Semi-variogrammes de la température minimum (Tmin)

Rayon d'étude imposé : 1 000 km. Forme retenue : linéaire.

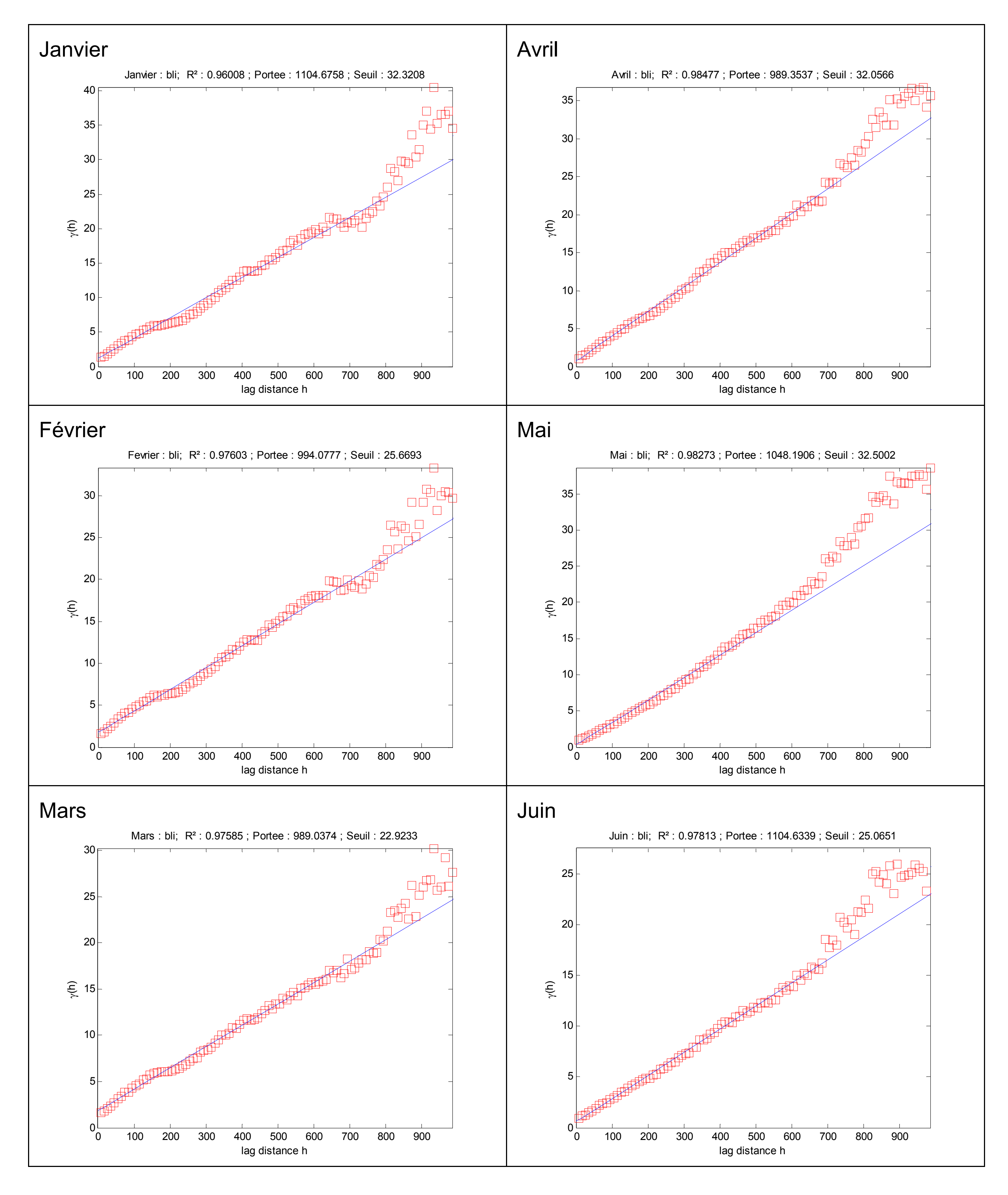


Semi-variogrammes de la température minimum (Tmin) – suite

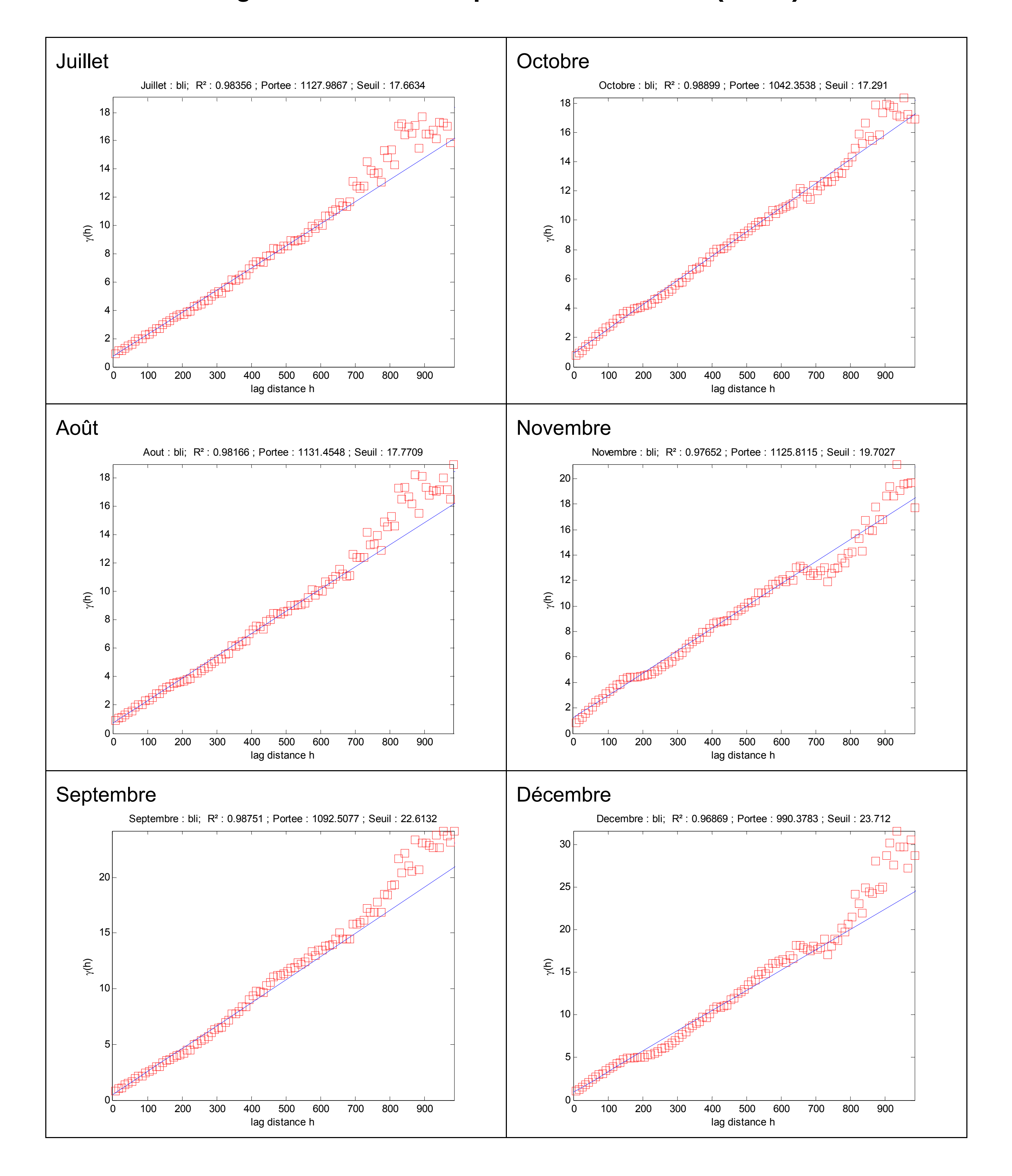


Annexe 3 : Semi-variogrammes de la température maximum (Tmax)

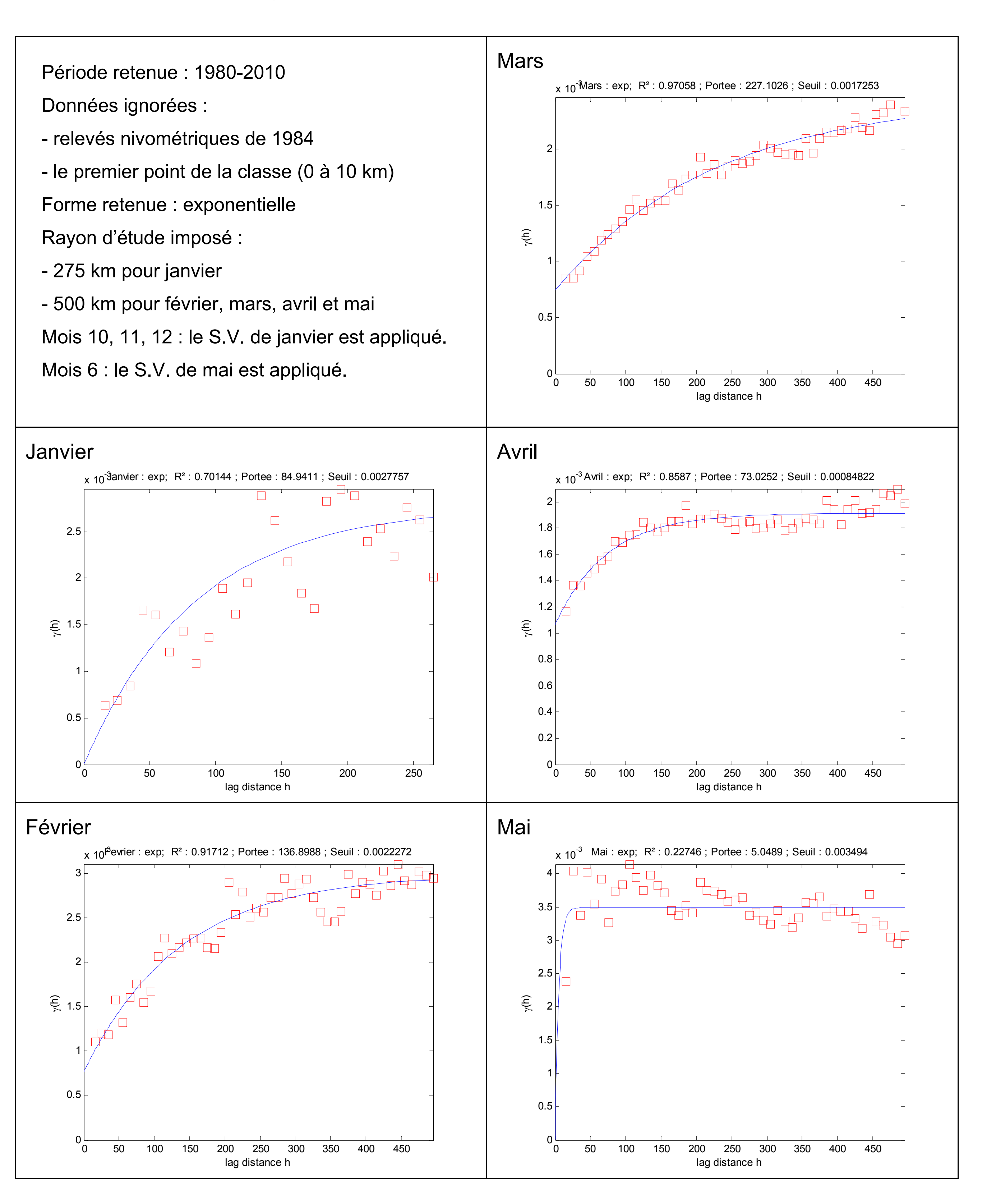
Rayon d'étude imposé : 1 000 km. Forme retenue : linéaire.



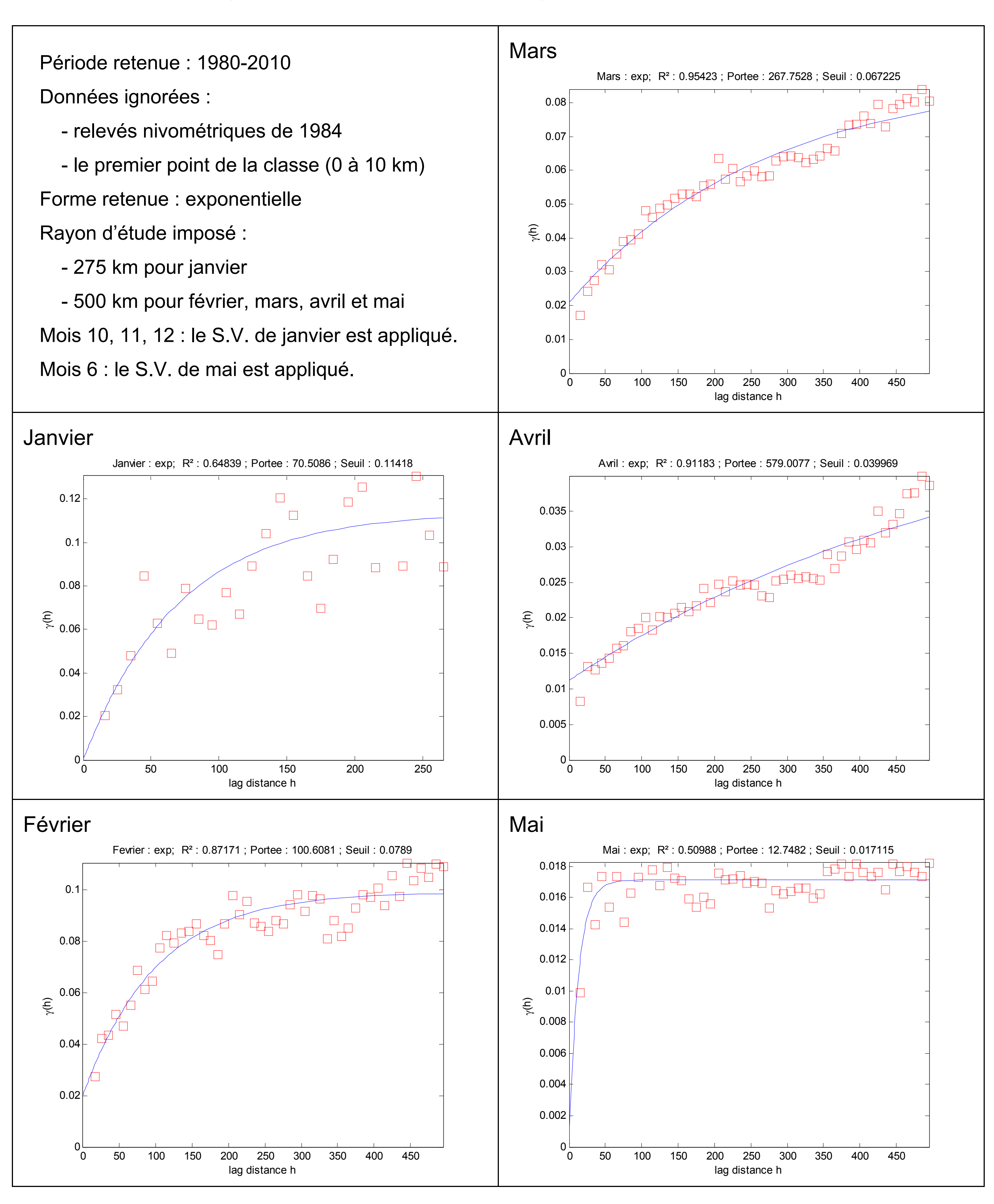
Semi-variogrammes de la température maximum (Tmax) – suite



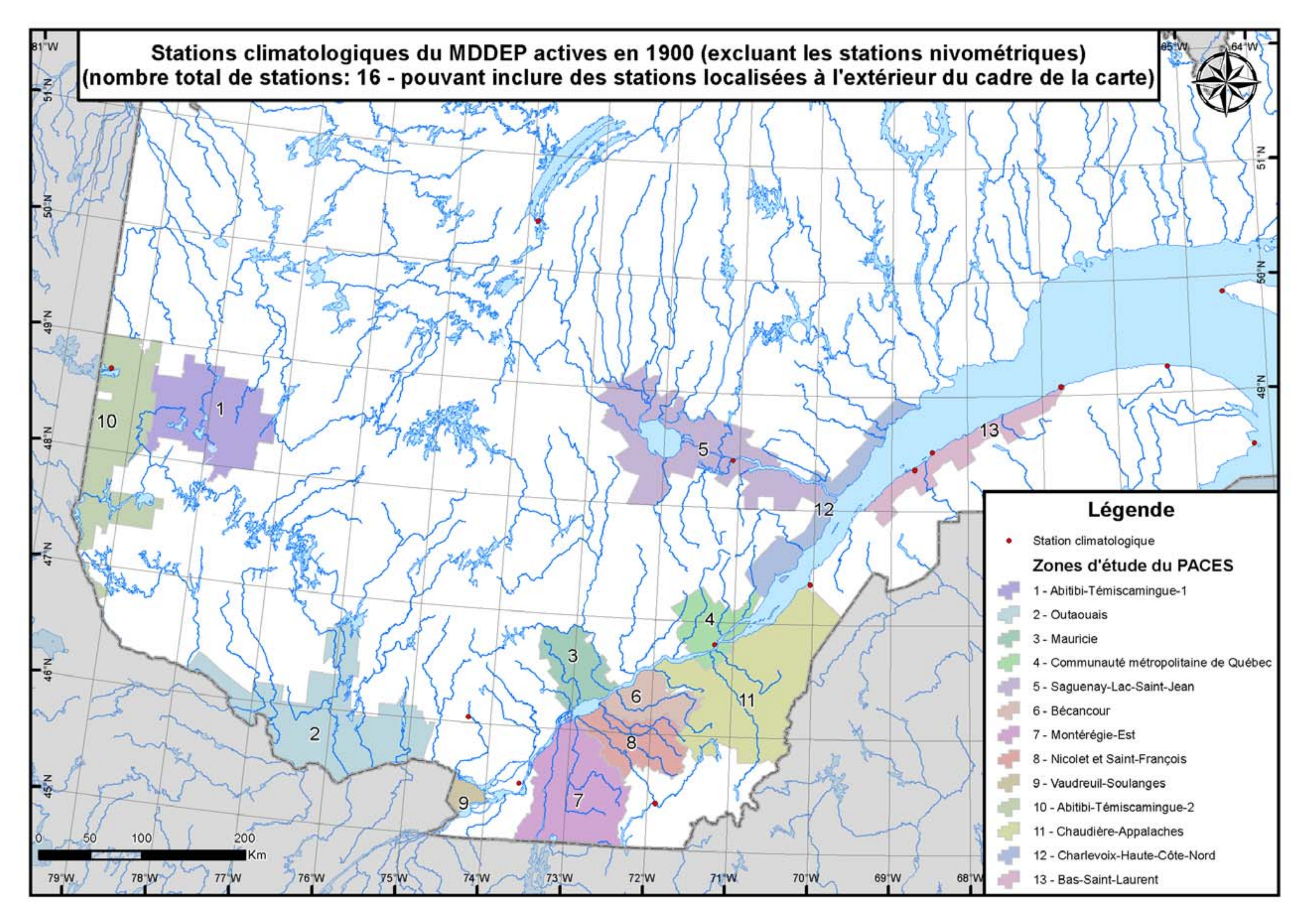
Annexe 4 : Semi-variogrammes (S.V.) de l'erreur du modèle de neige sur l'ÉEN



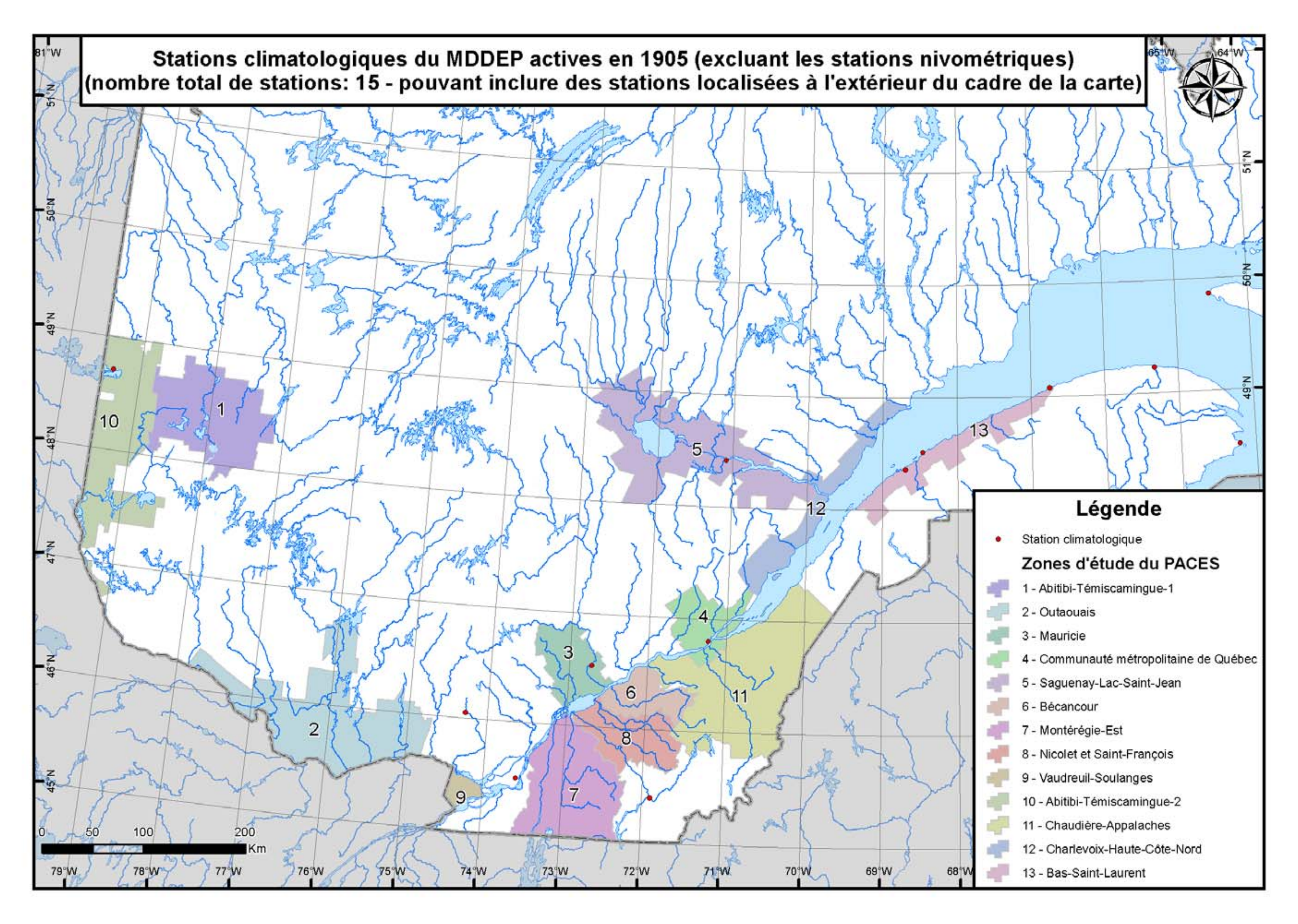
Annexe 5 : Semi-variogrammes (S.V.) de l'erreur du modèle de neige sur la hauteur de neige



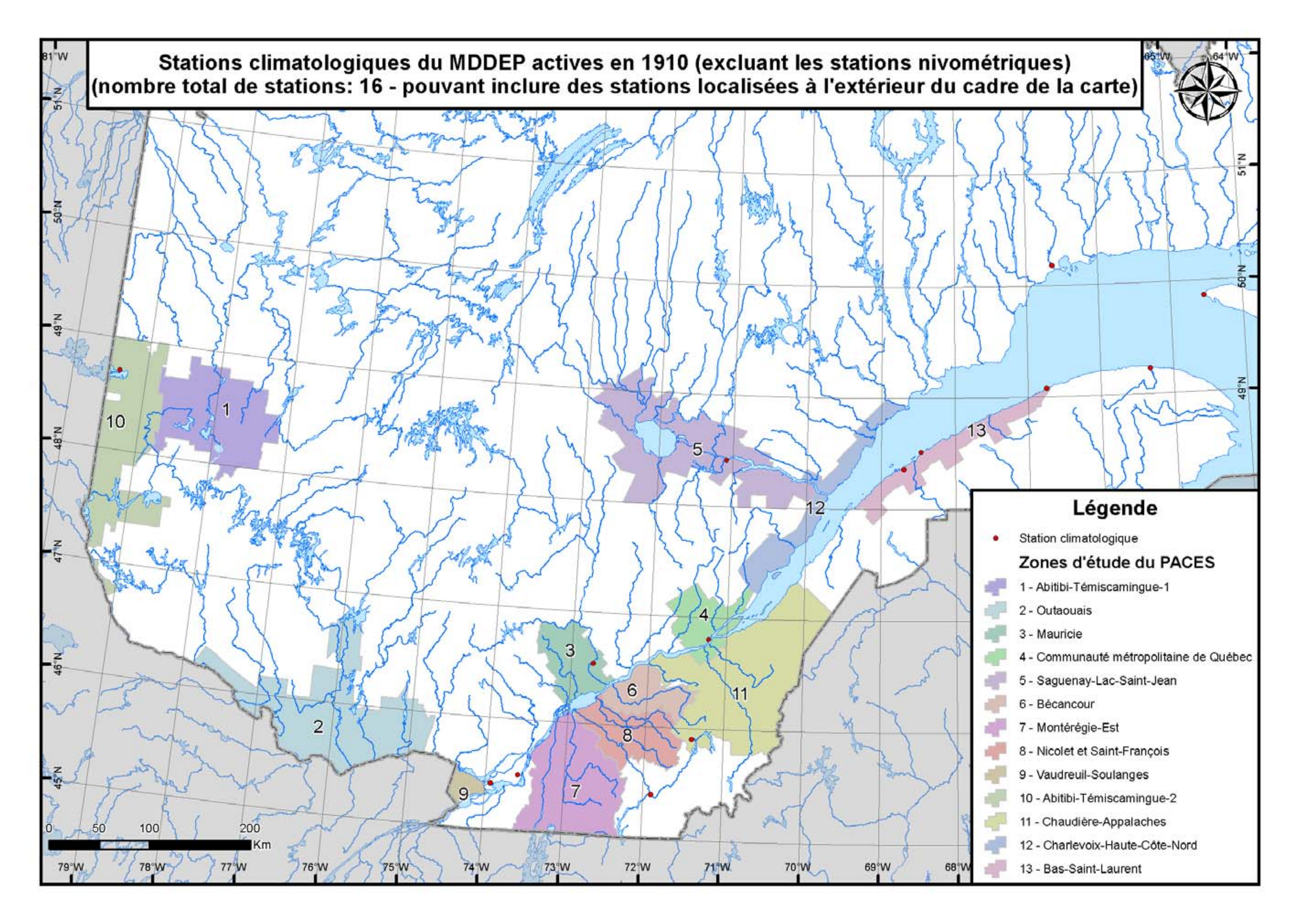
Annexe 6 : Cartes illustrant les stations climatologiques ouvertes à intervalle quinquennal entre 1900 et 2010.



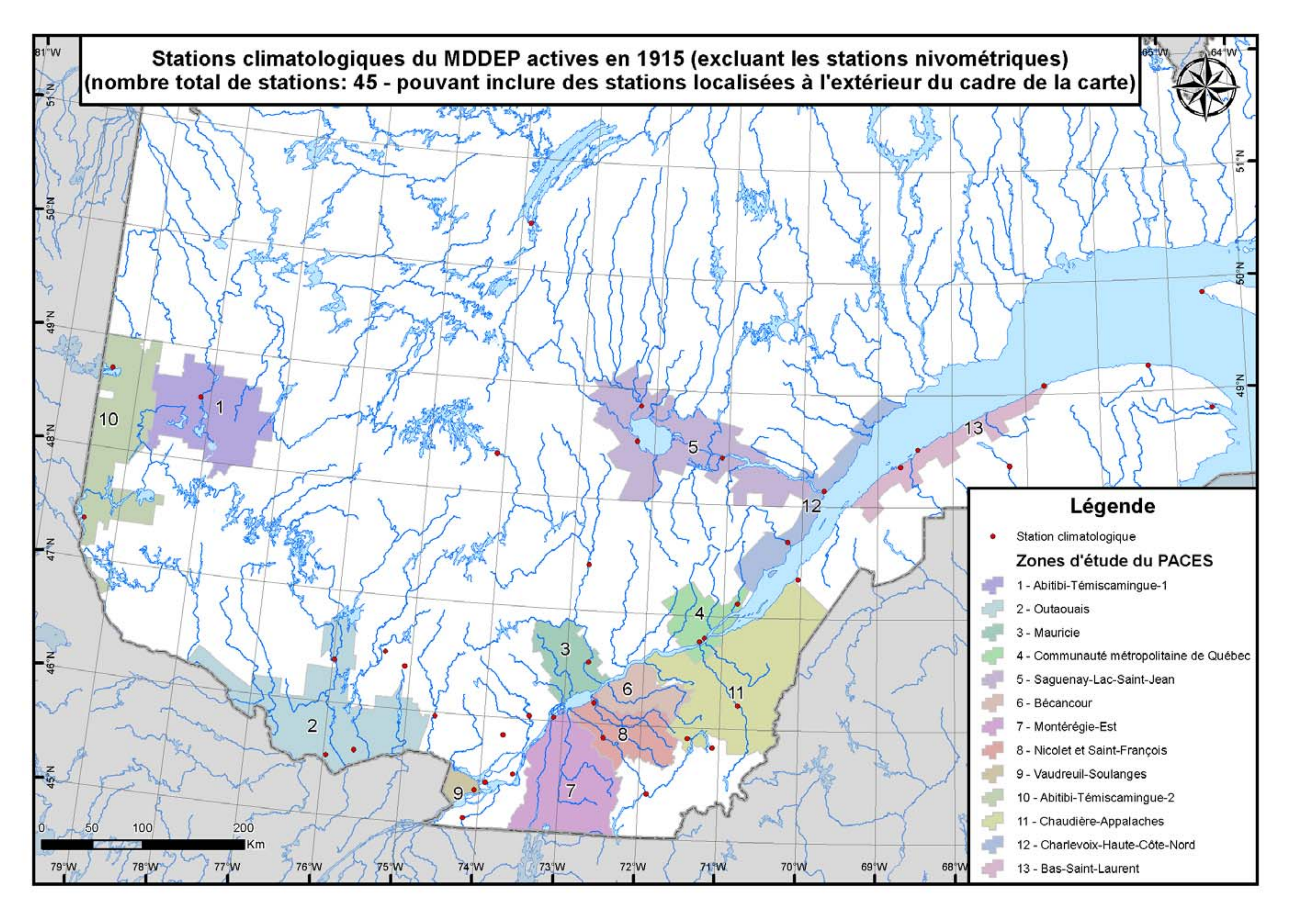
Annexe 6.1 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1900



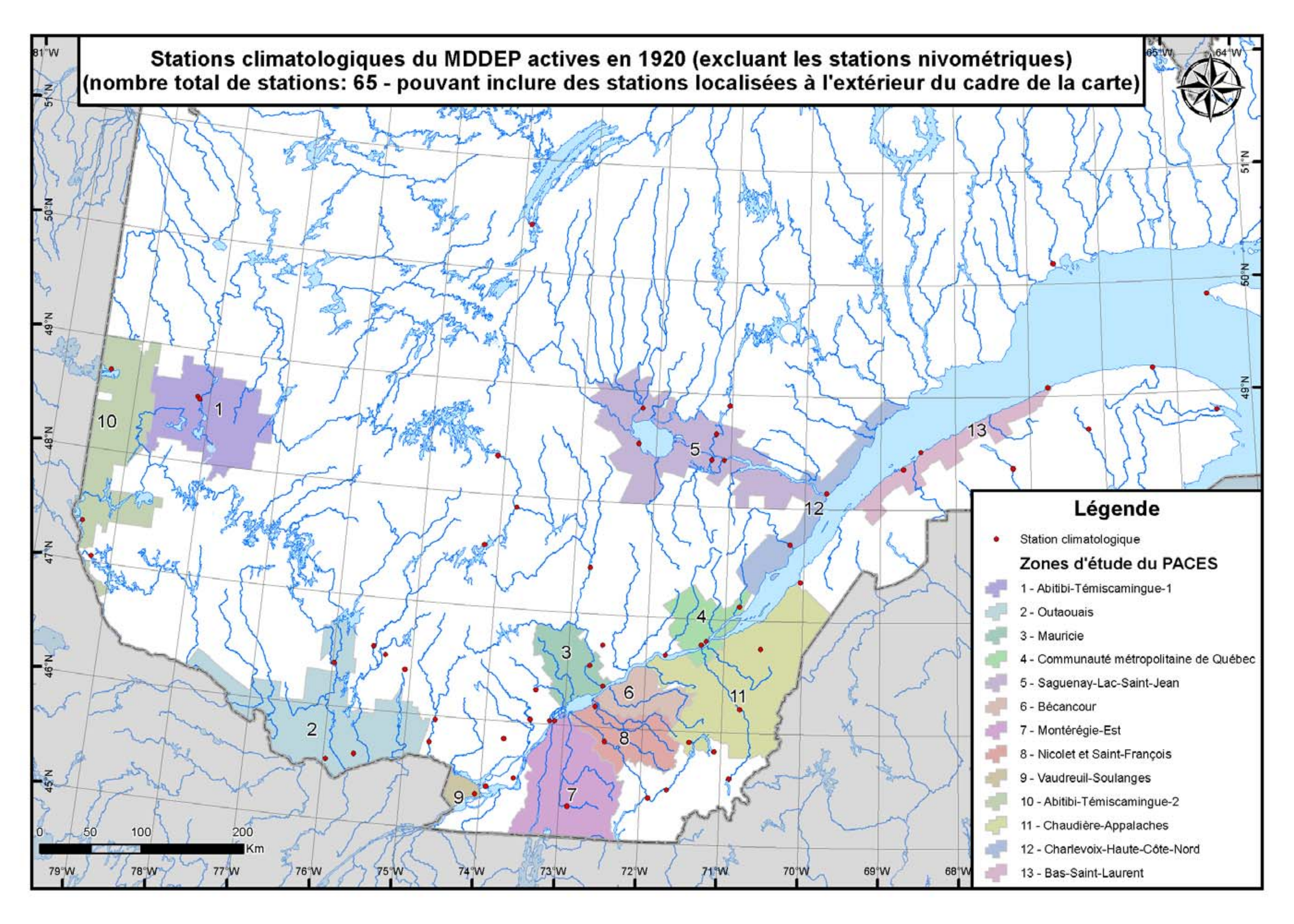
Annexe 6.2 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1905



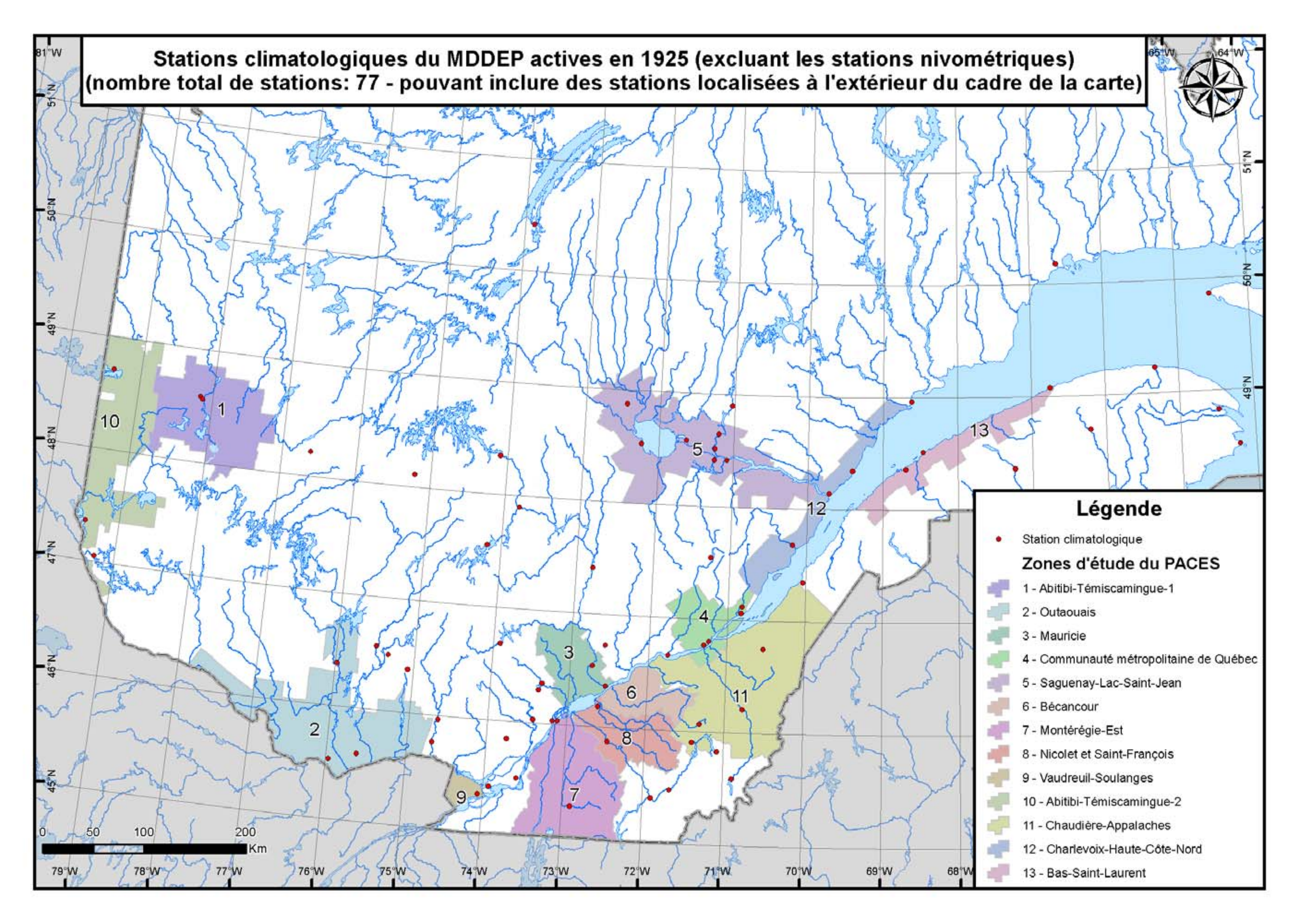
Annexe 6.3 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1910



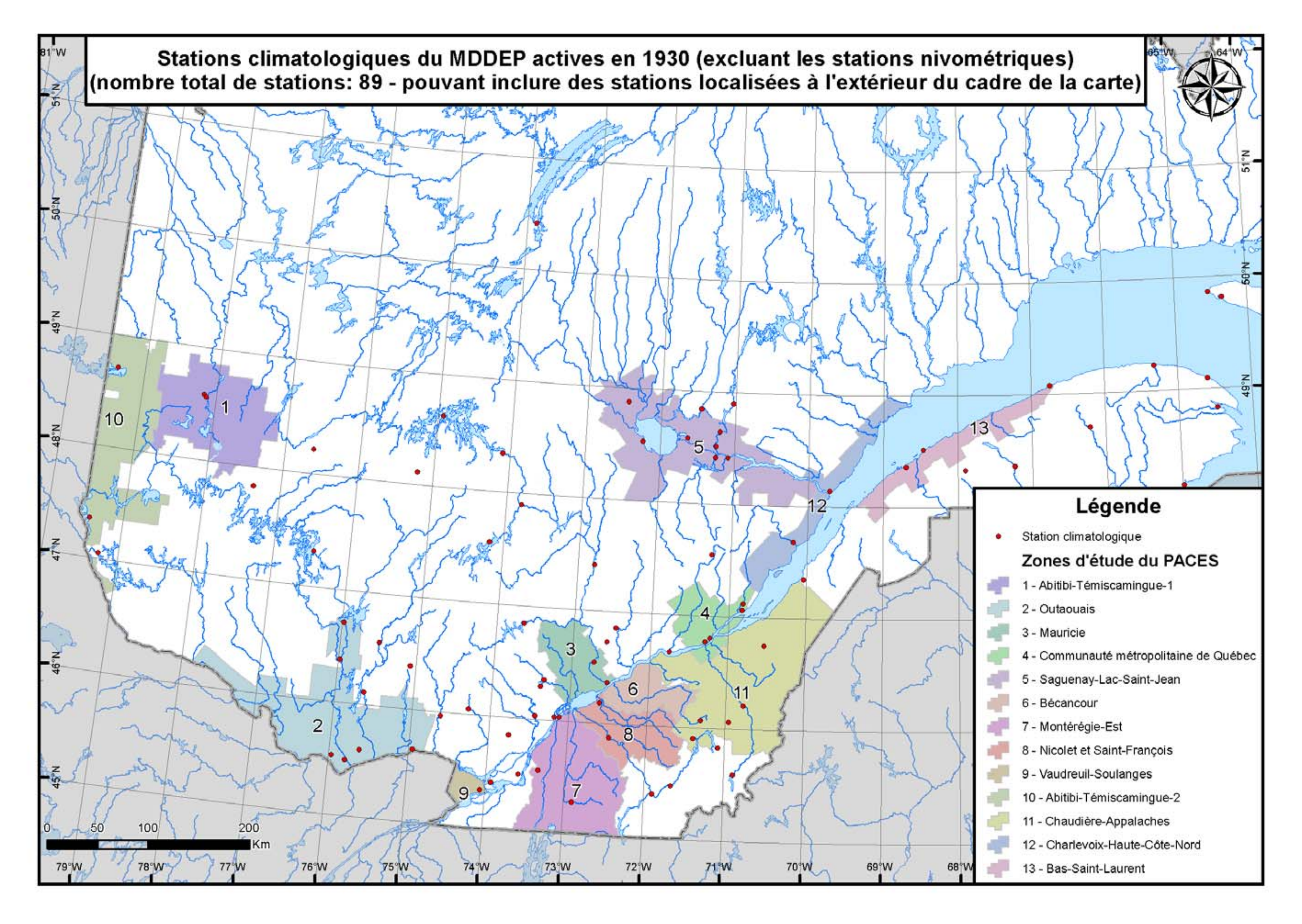
Annexe 6.4 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1915



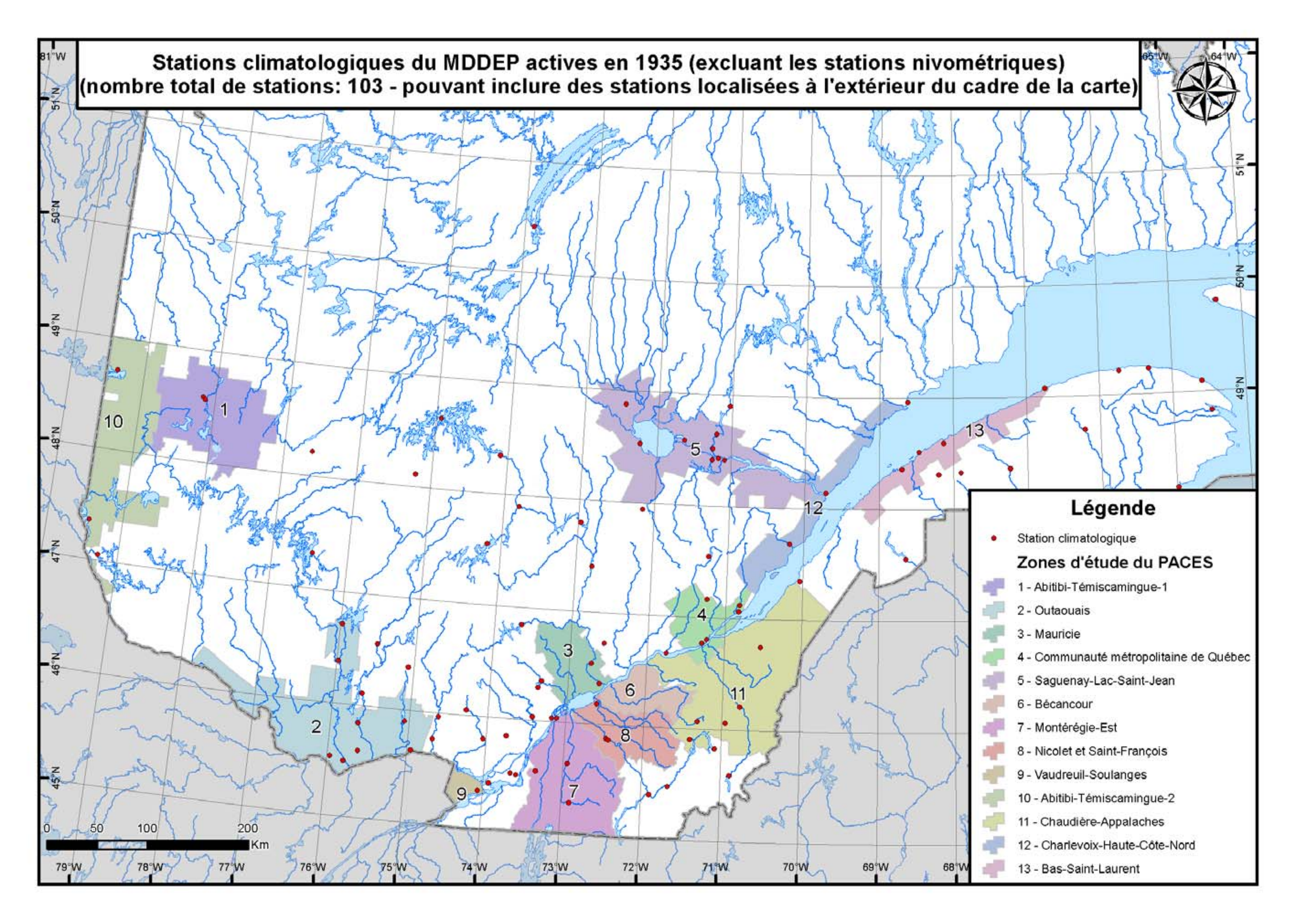
Annexe 6.5 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1920



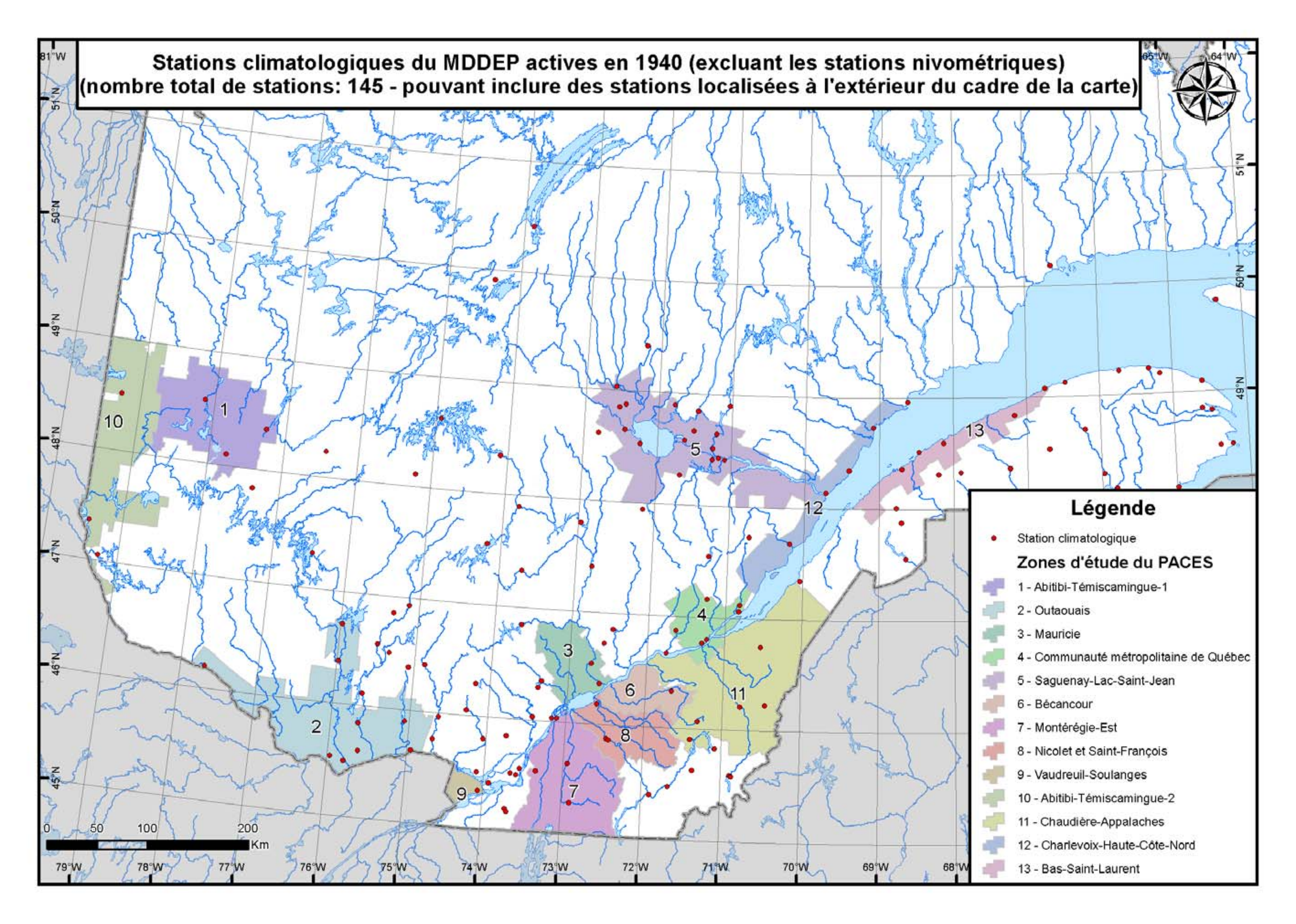
Annexe 6.6 Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1925



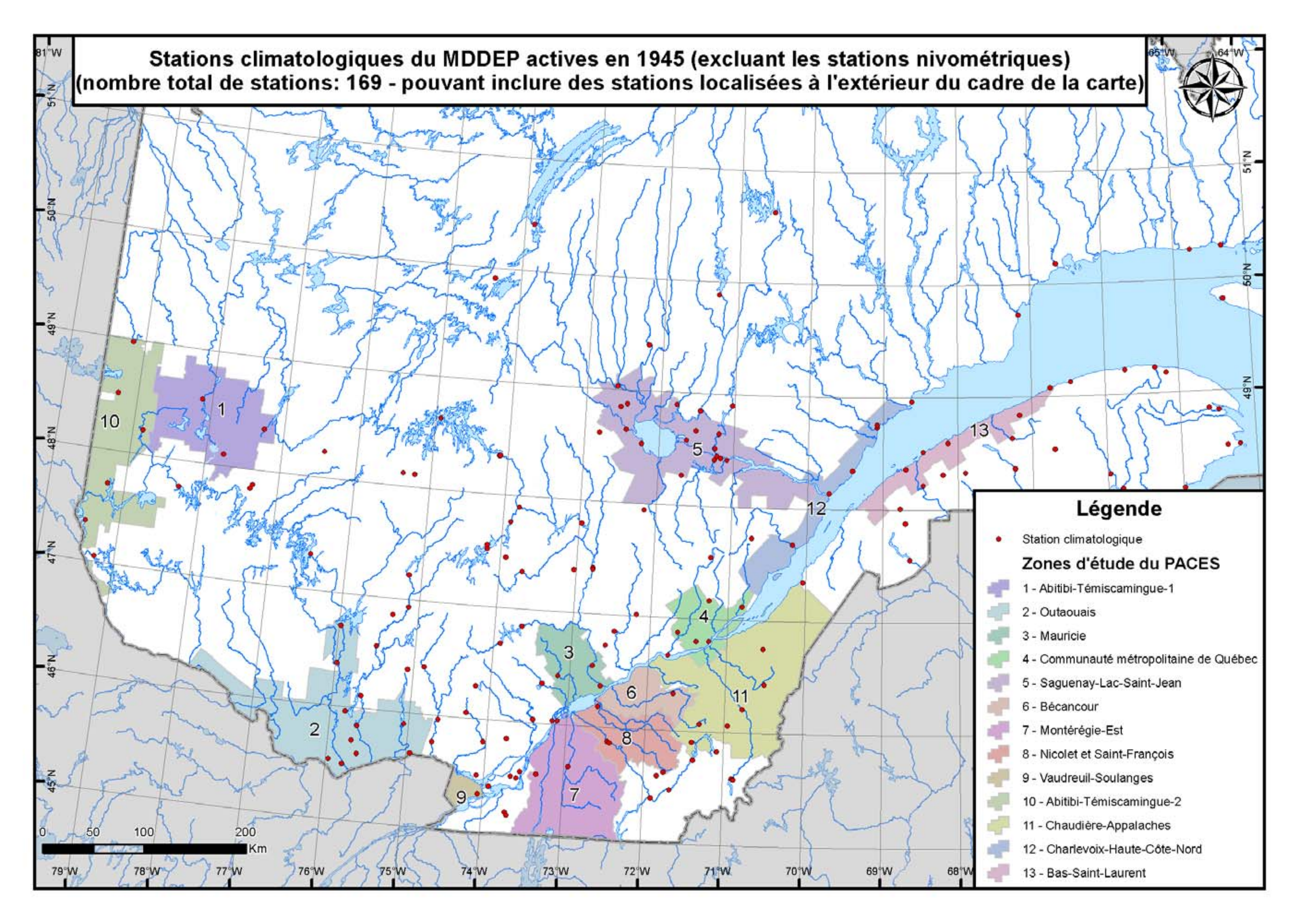
Annexe 6.7 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1930



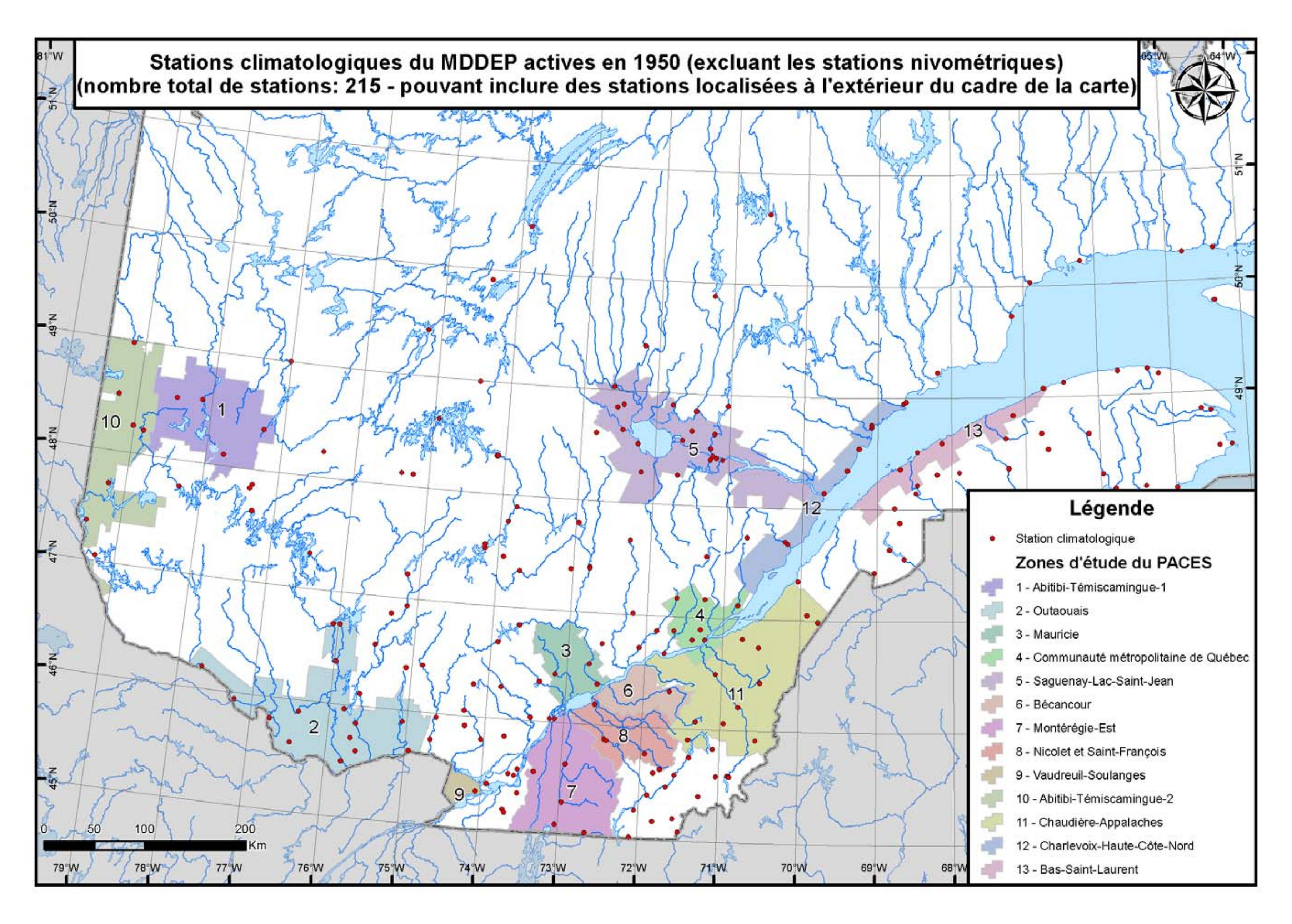
Annexe 6.8 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1935



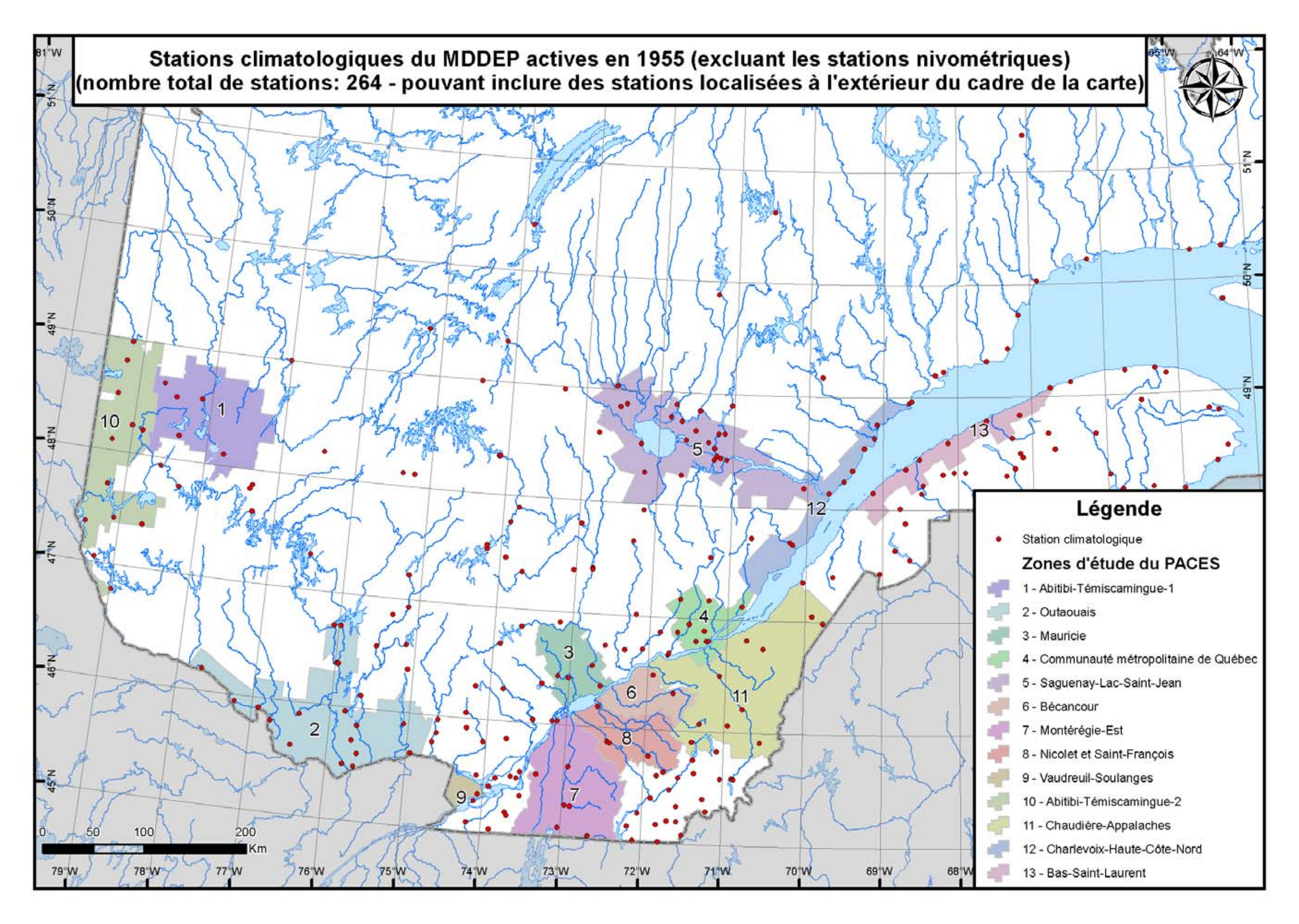
Annexe 6.9 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1940



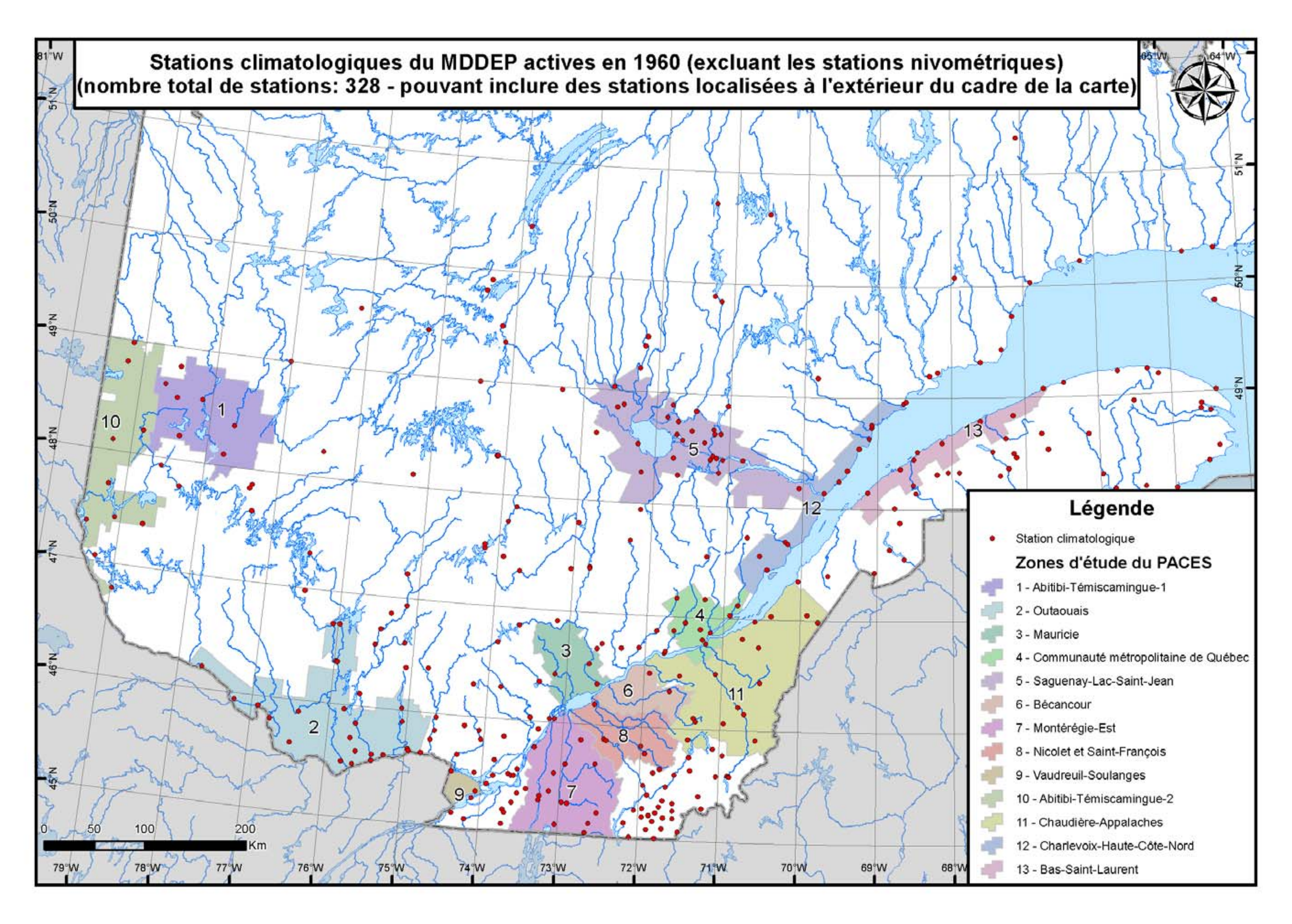
Annexe 6.10 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1945



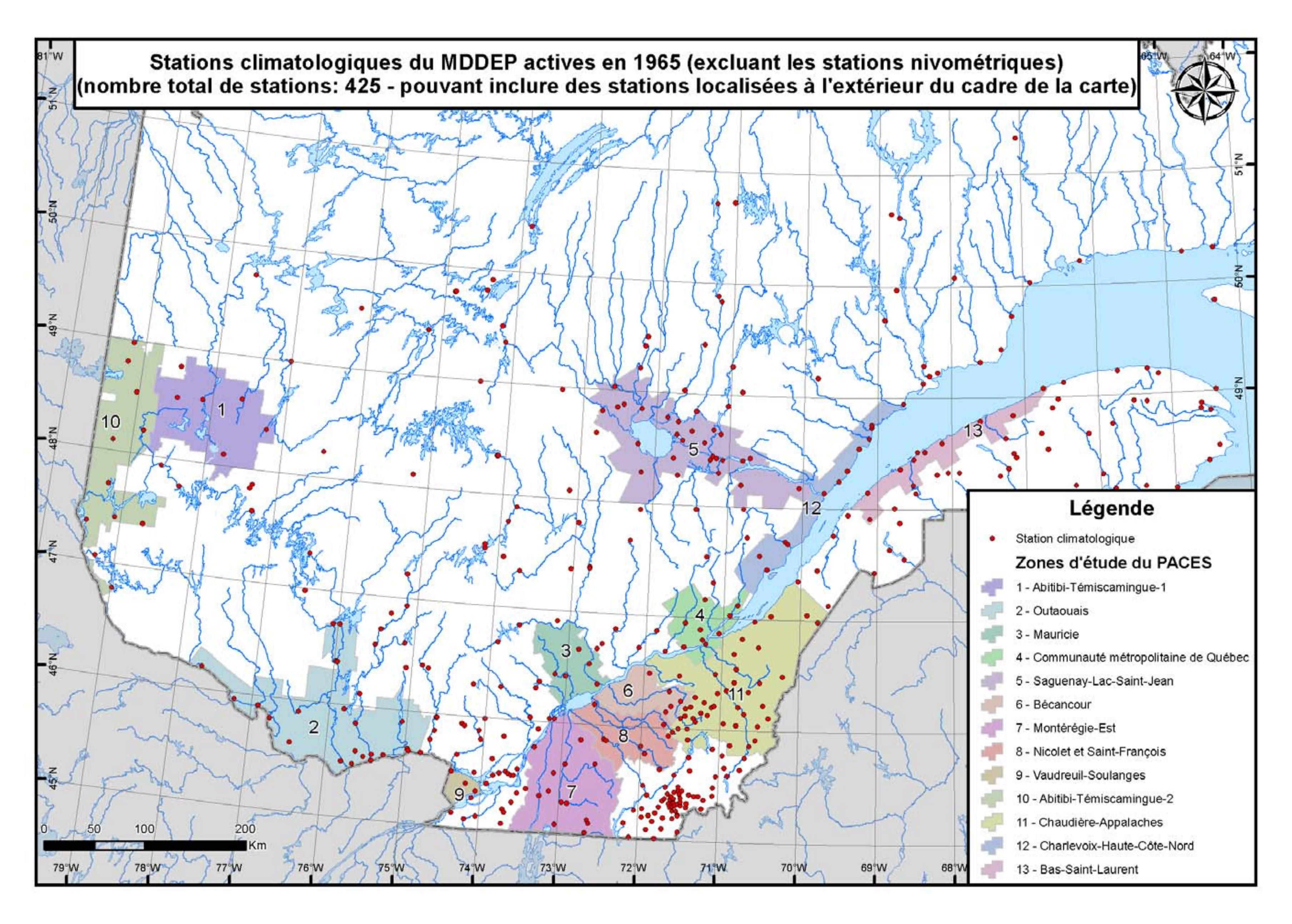
Annexe 6.11 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1950



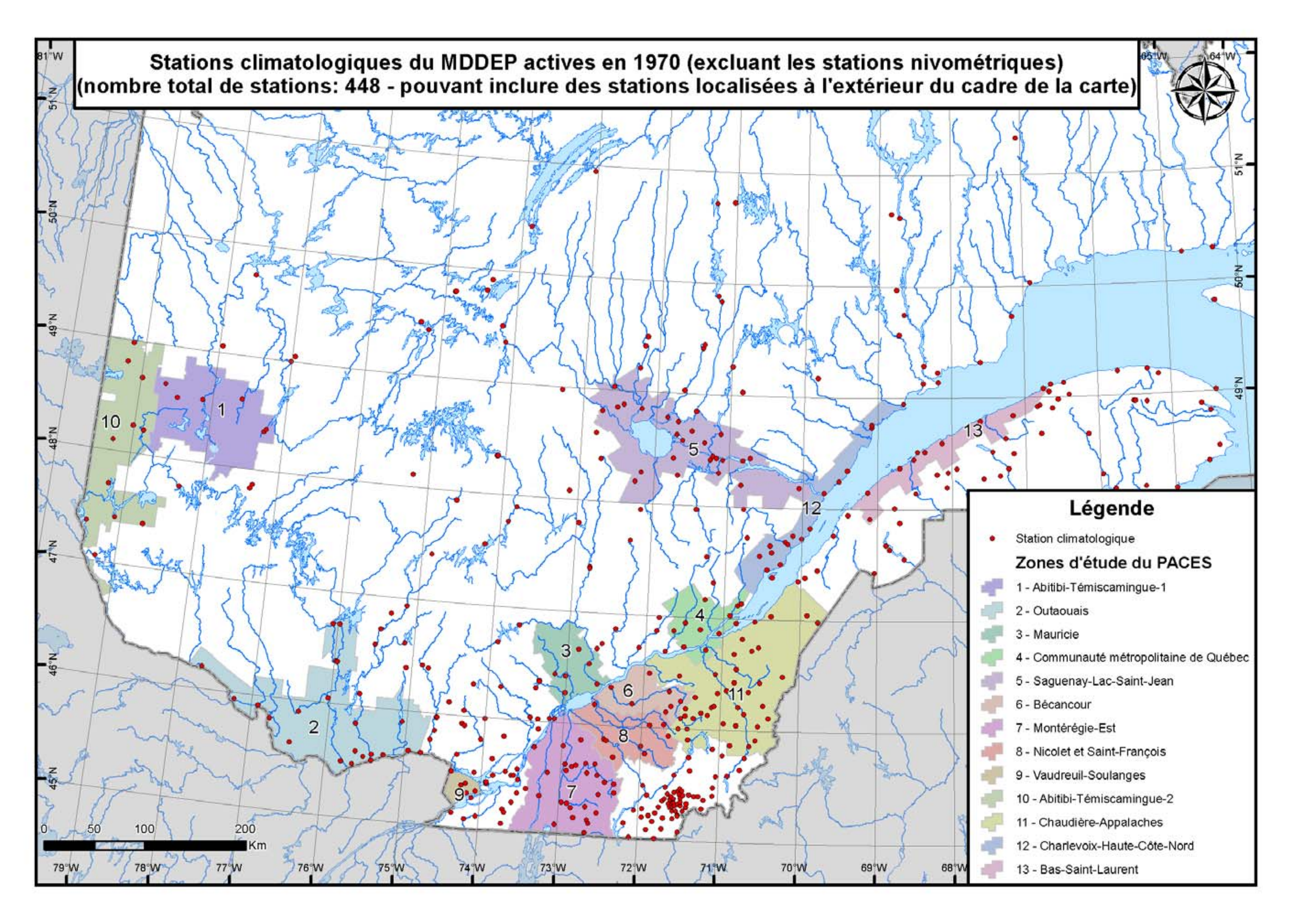
Annexe 6.12 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1955



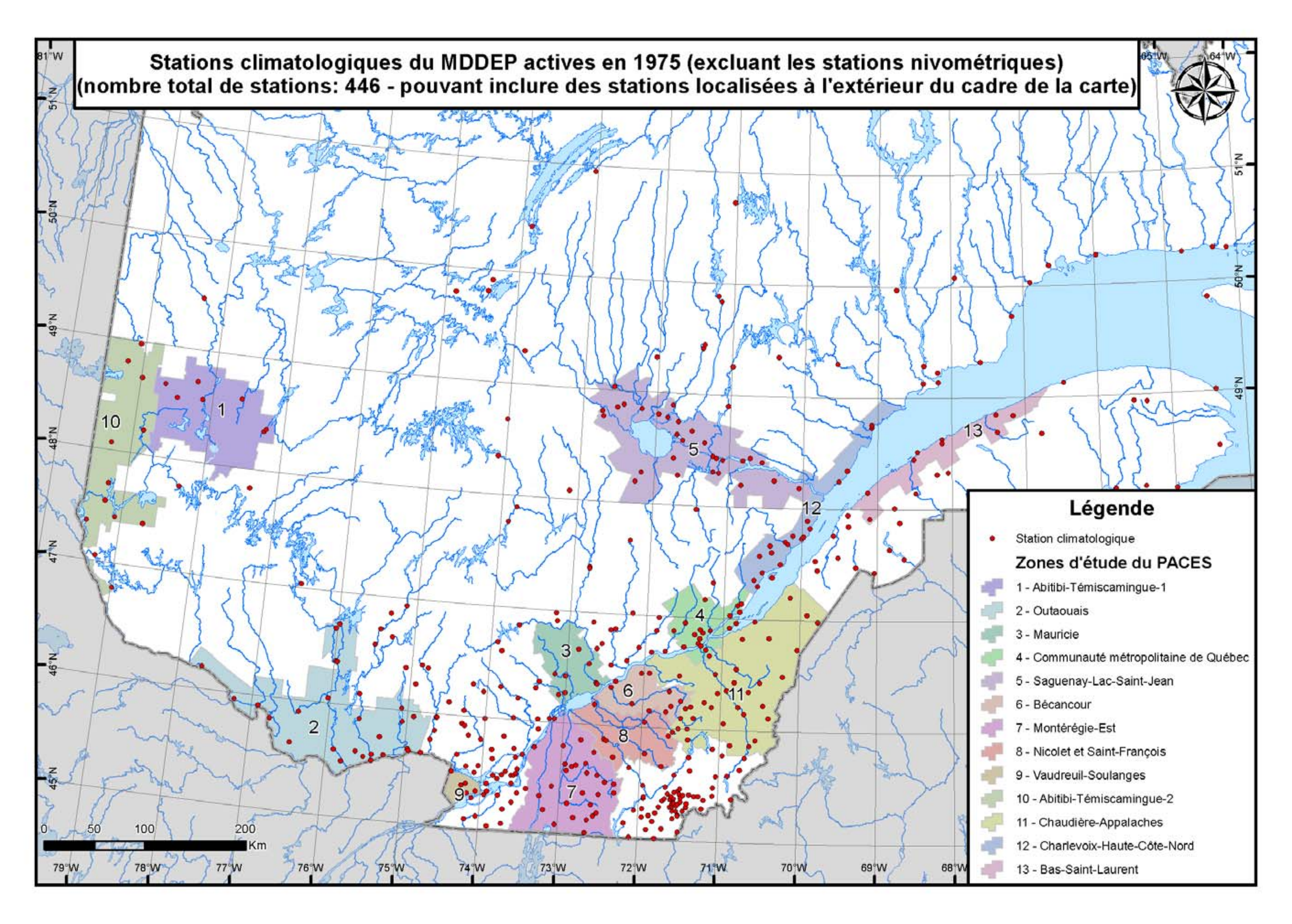
Annexe 6.13 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1960



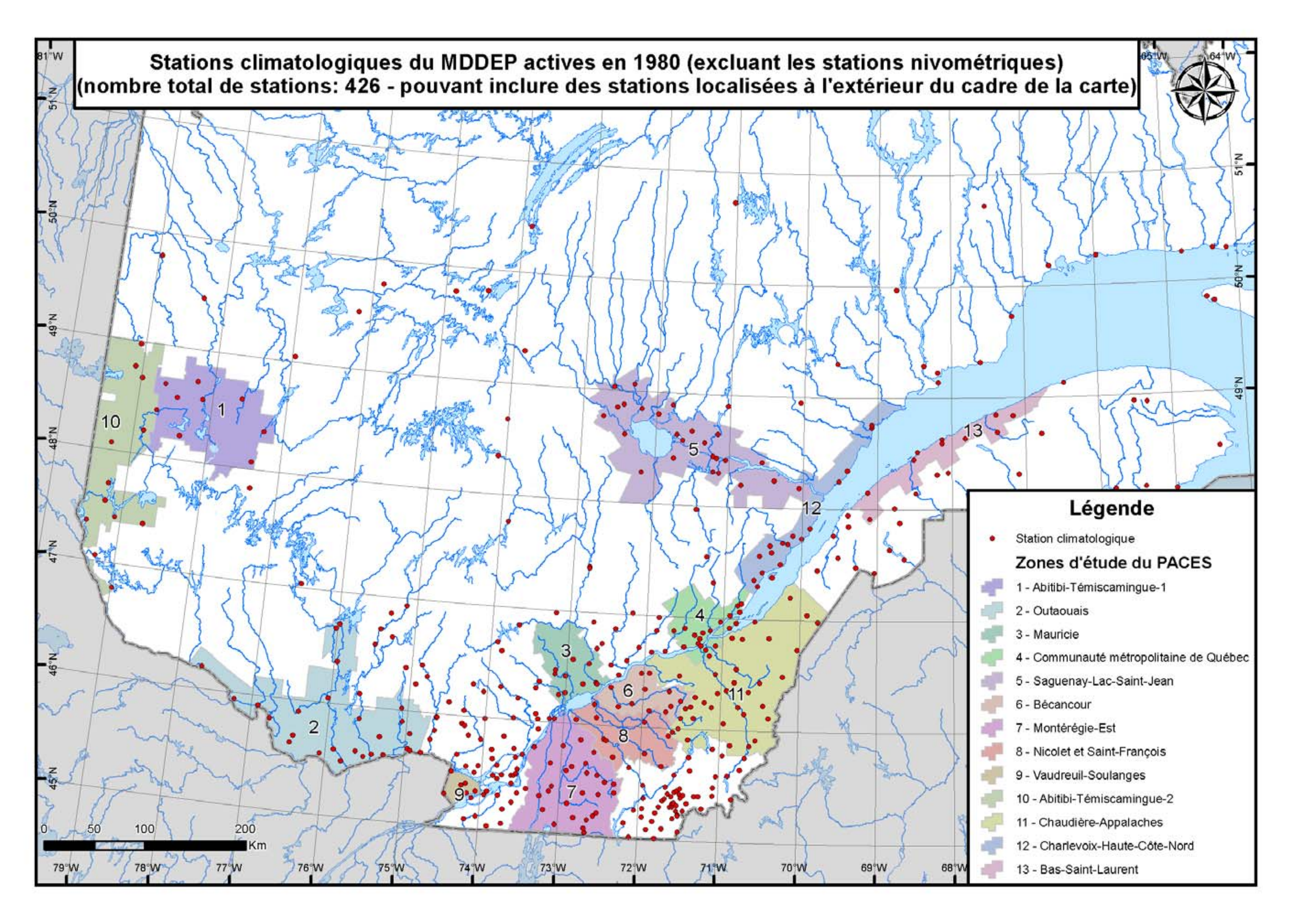
Annexe 6.14 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1965



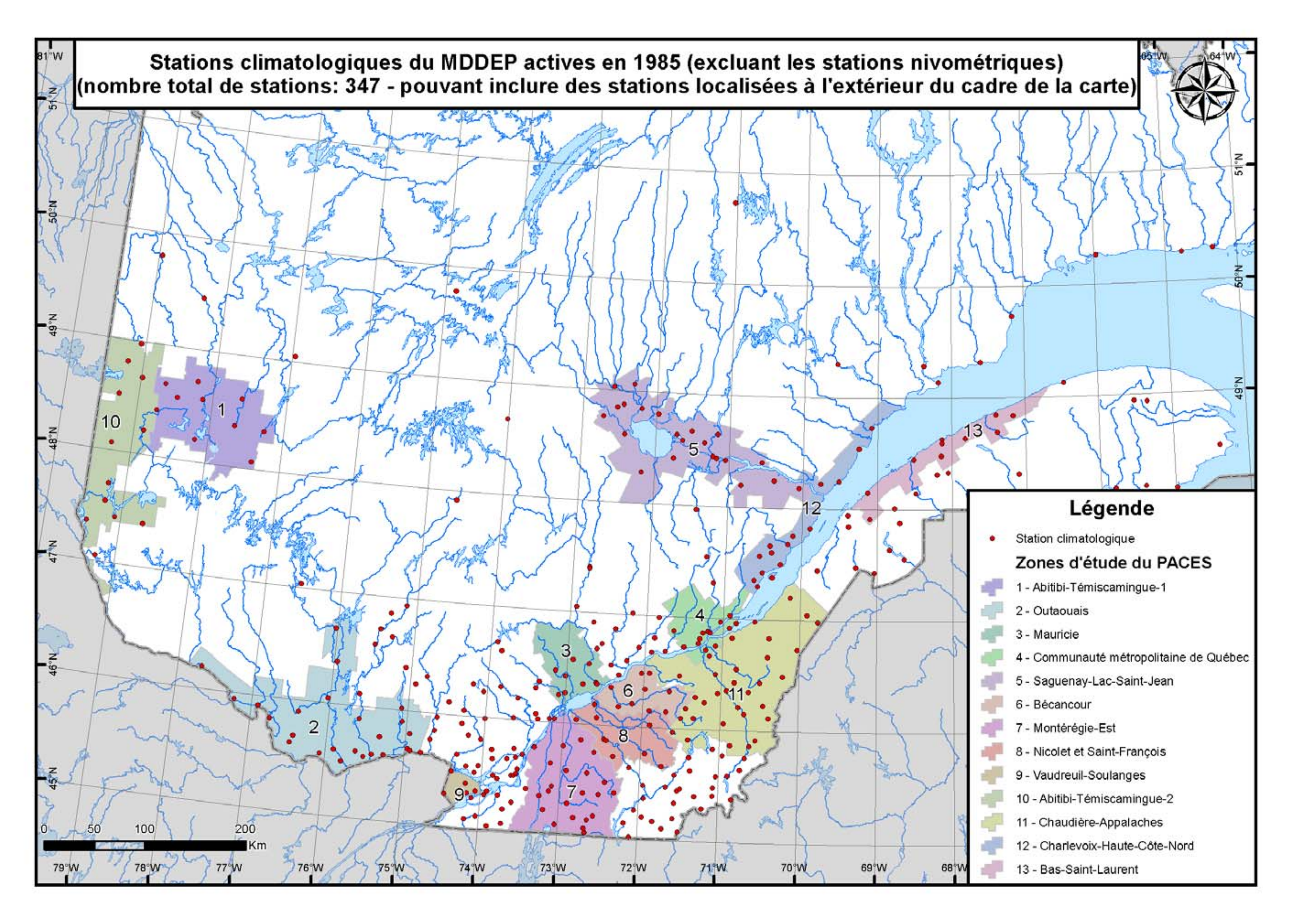
Annexe 6.15 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1970



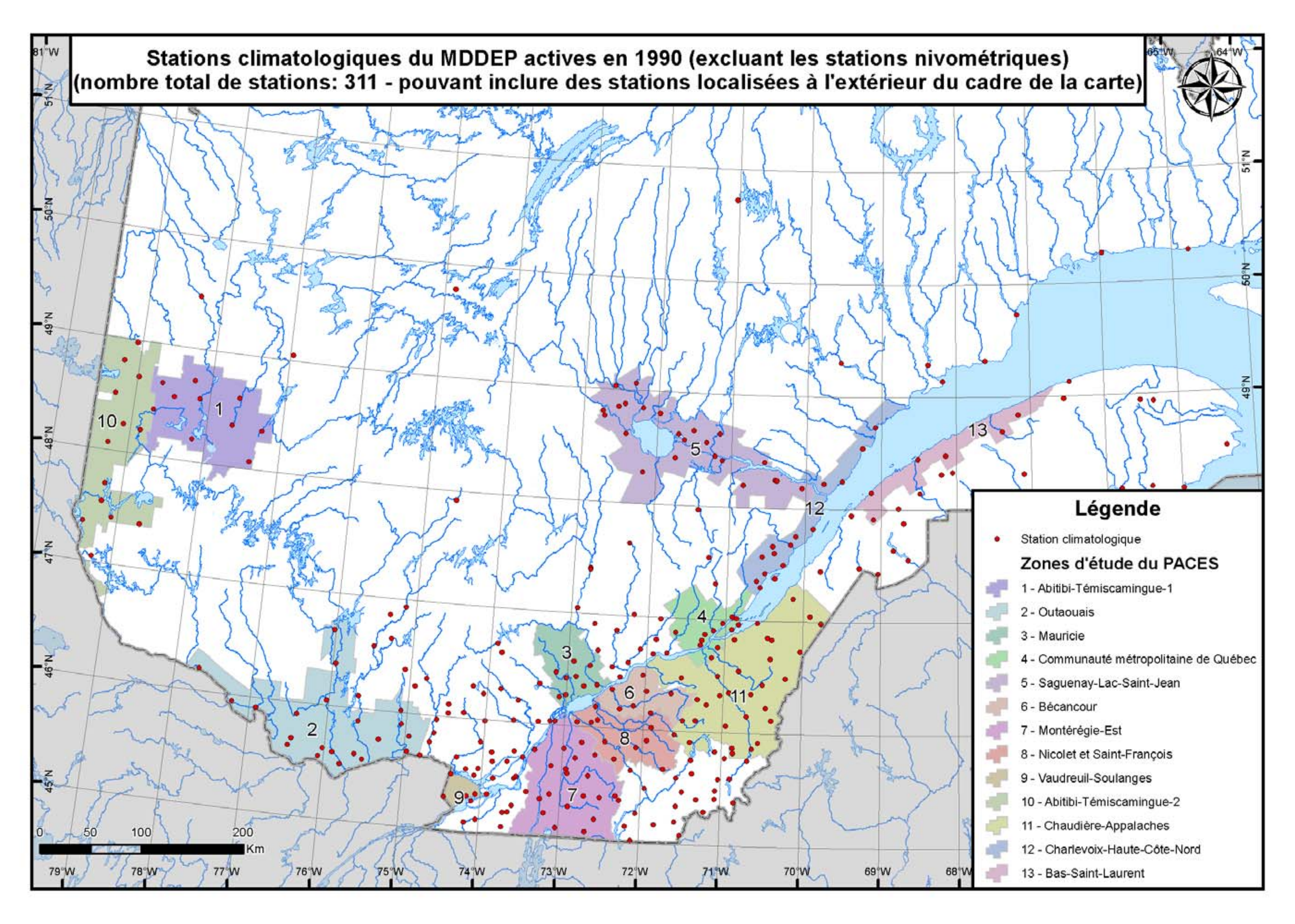
Annexe 6.16 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1975



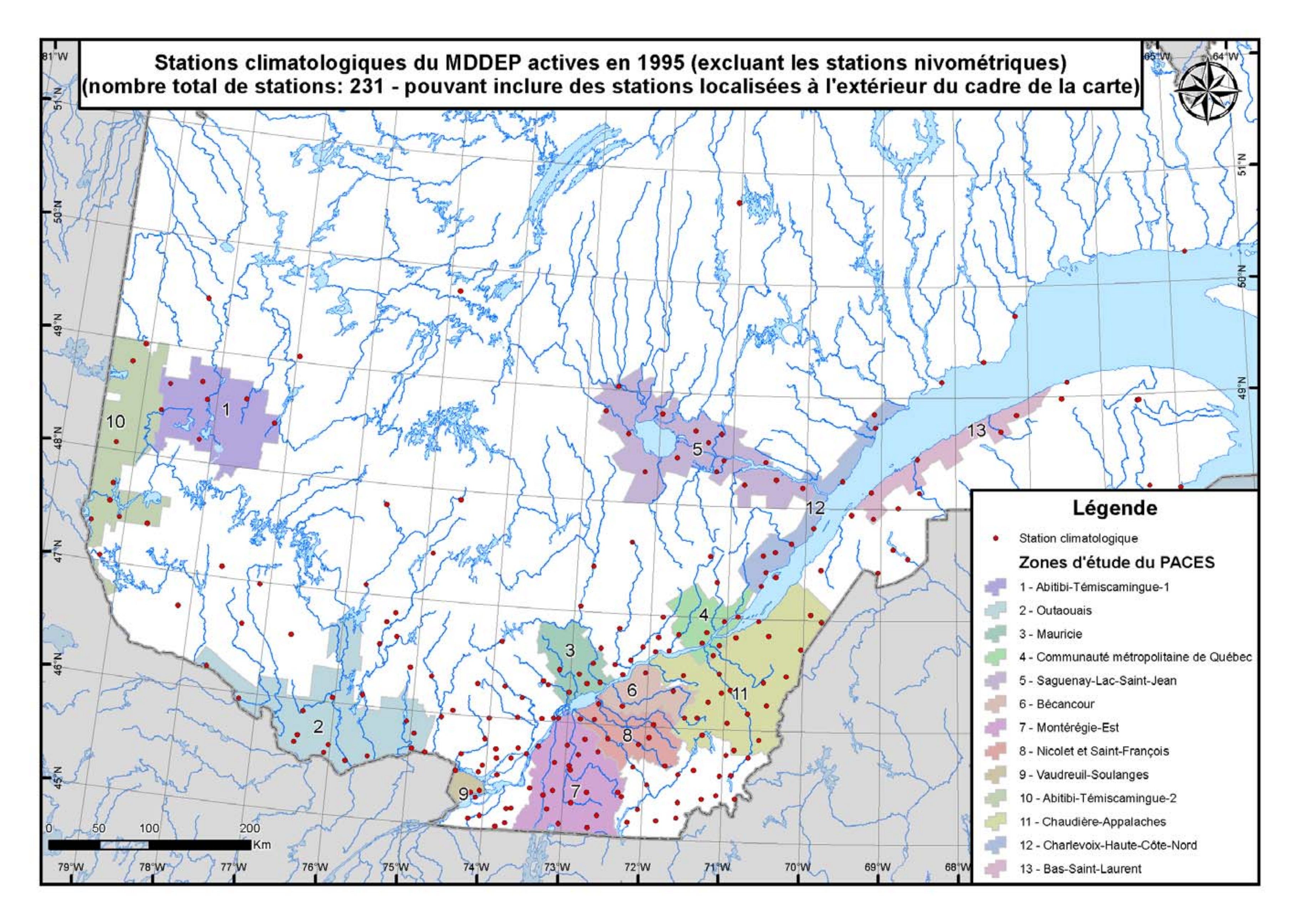
Annexe 6.17 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1980



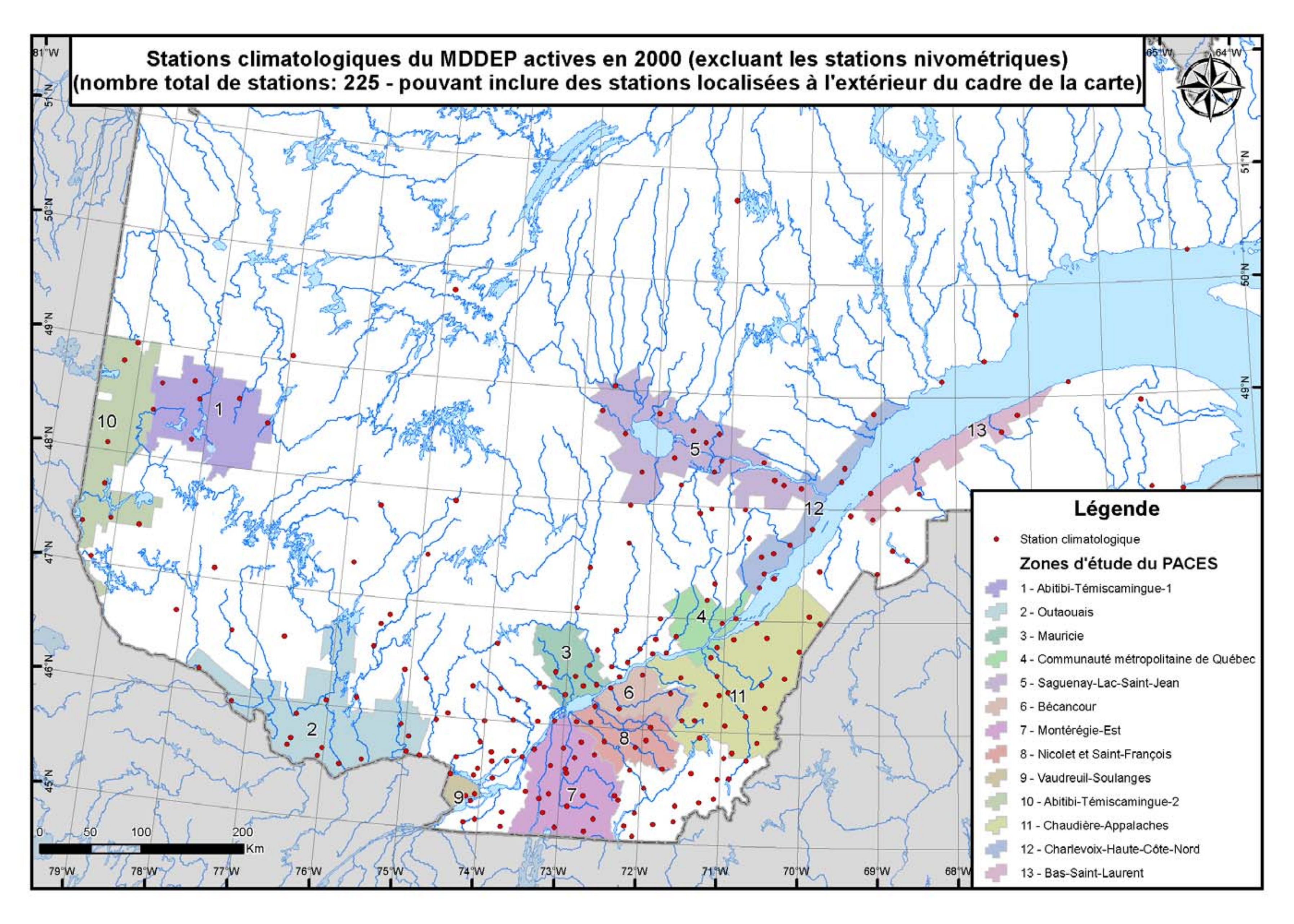
Annexe 6.18 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1985



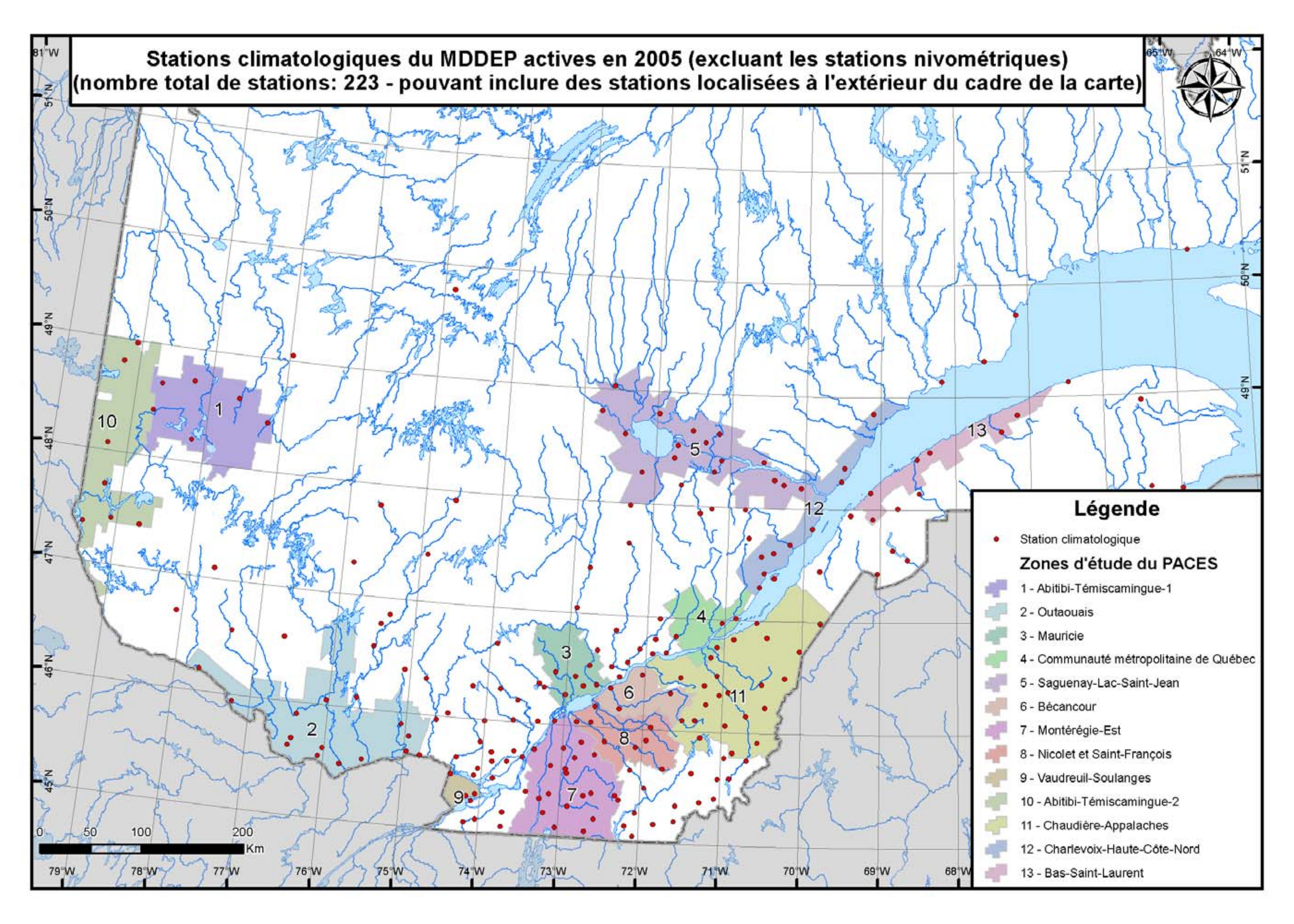
Annexe 6.19 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1990



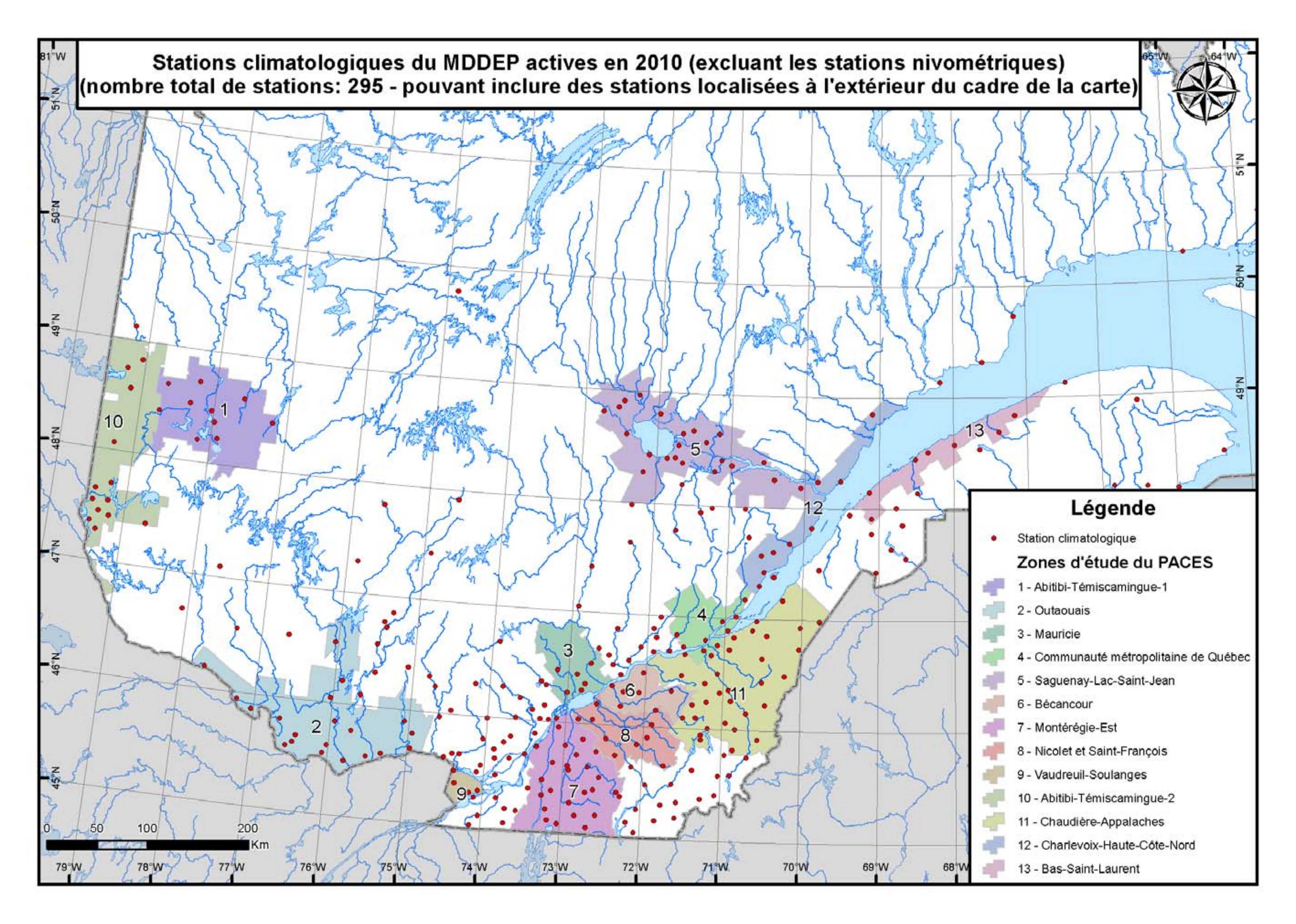
Annexe 6.20 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 1995



Annexe 6.21 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 2000

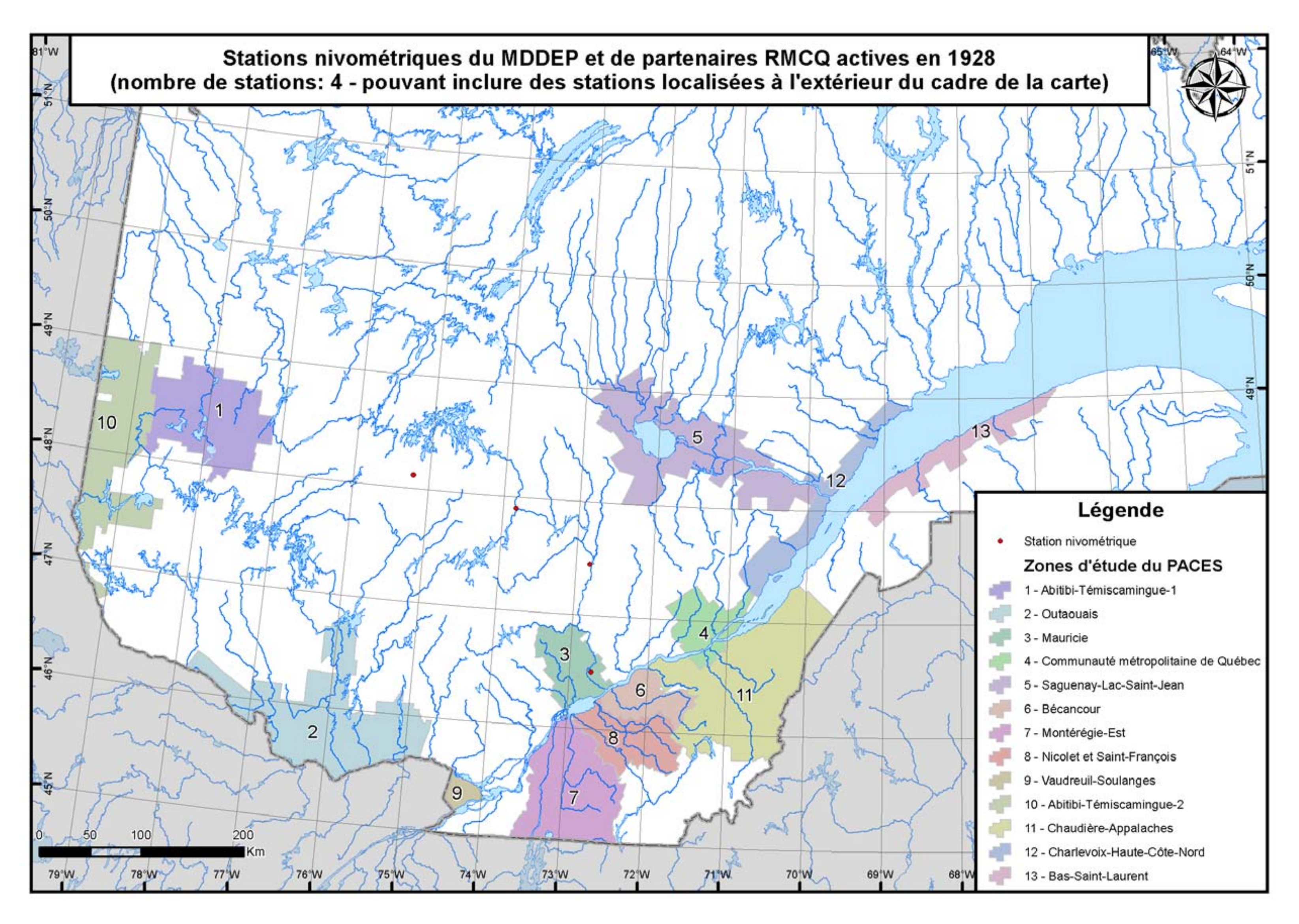


Annexe 6.22 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 2005

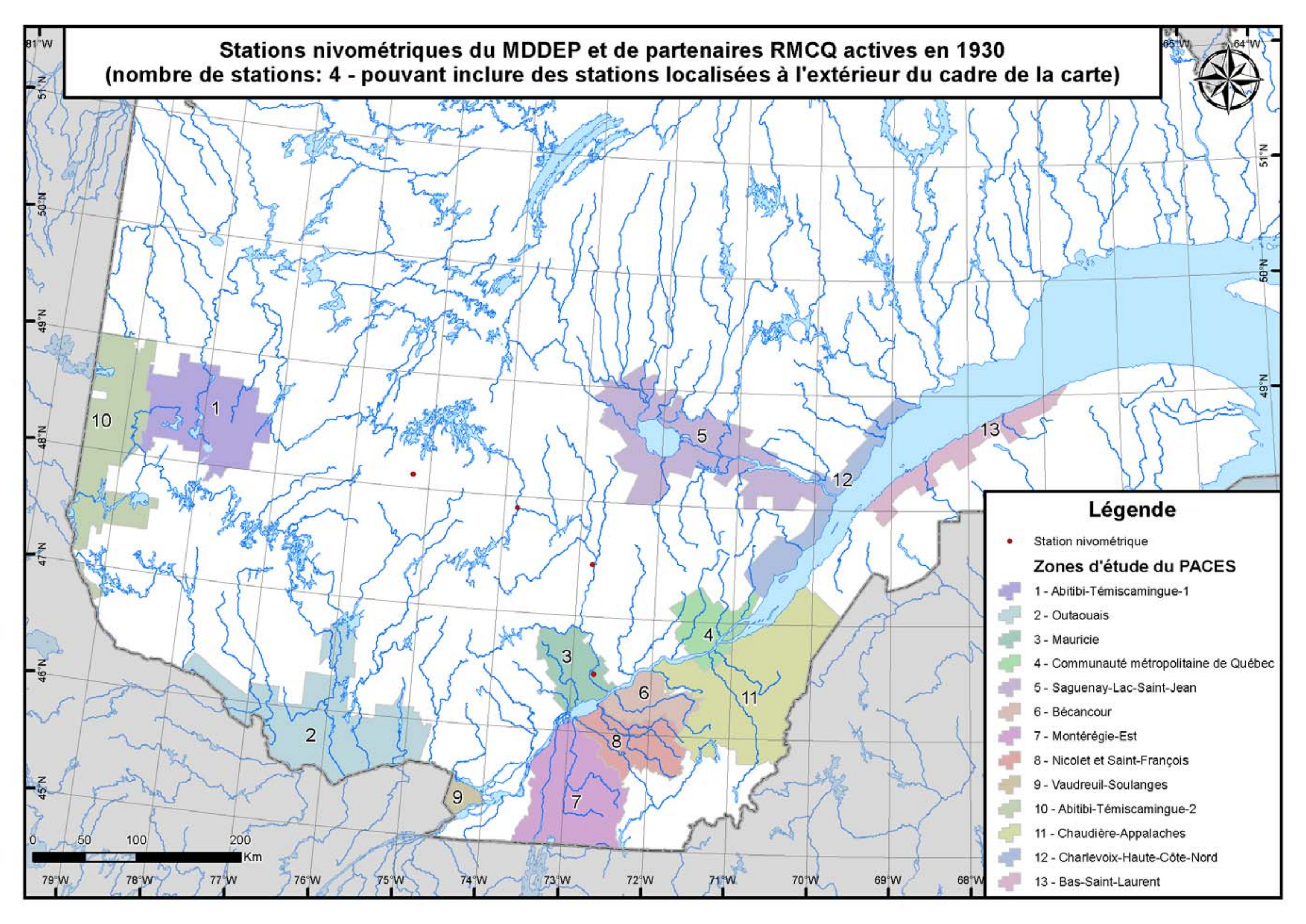


Annexe 6.23 : Carte illustrant les stations climatologiques ouvertes en 2010

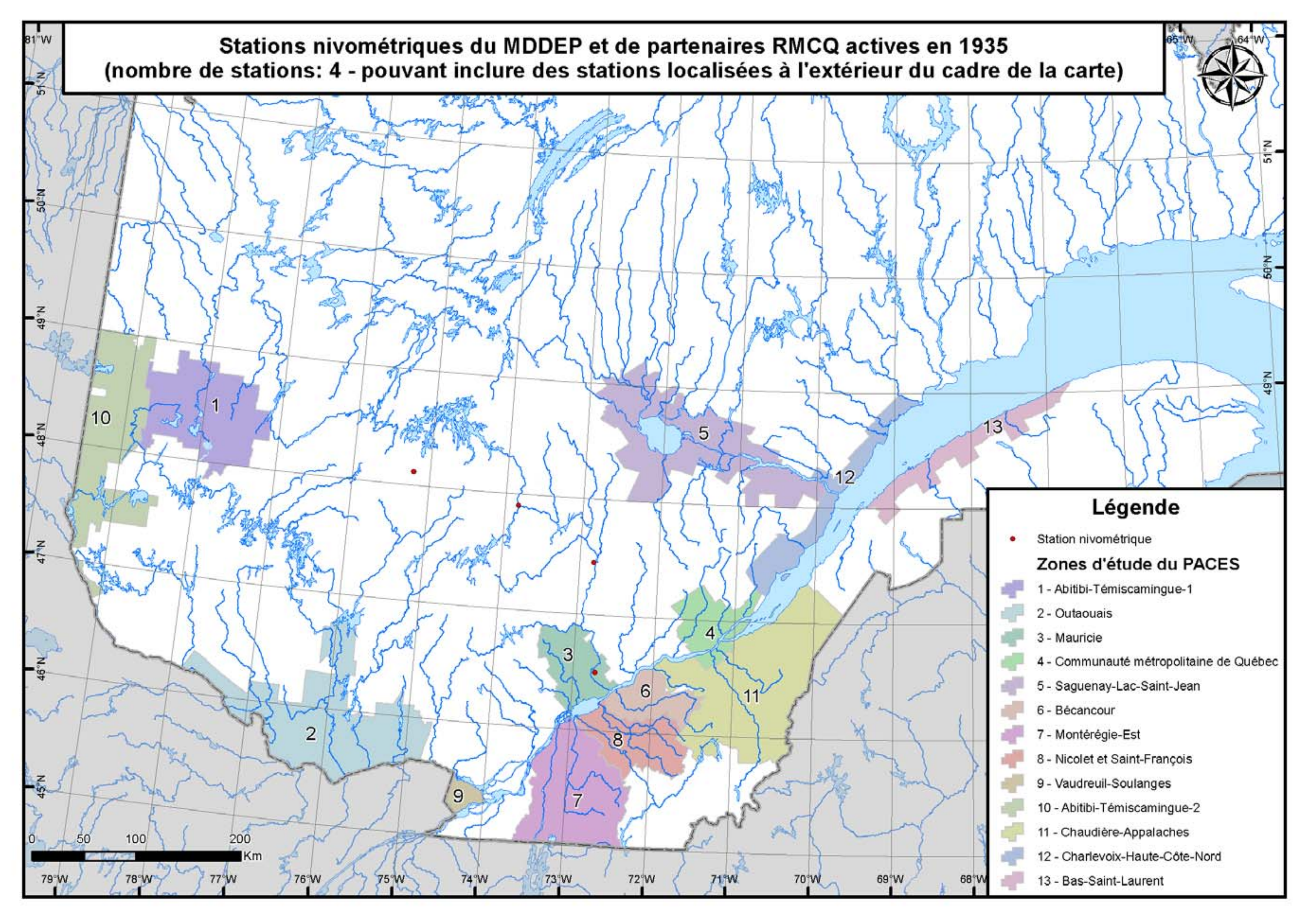
Annexe 7 : Cartes illustrant les stations nivométriques ouvertes à intervalle quinquennal entre 1928 et 2010



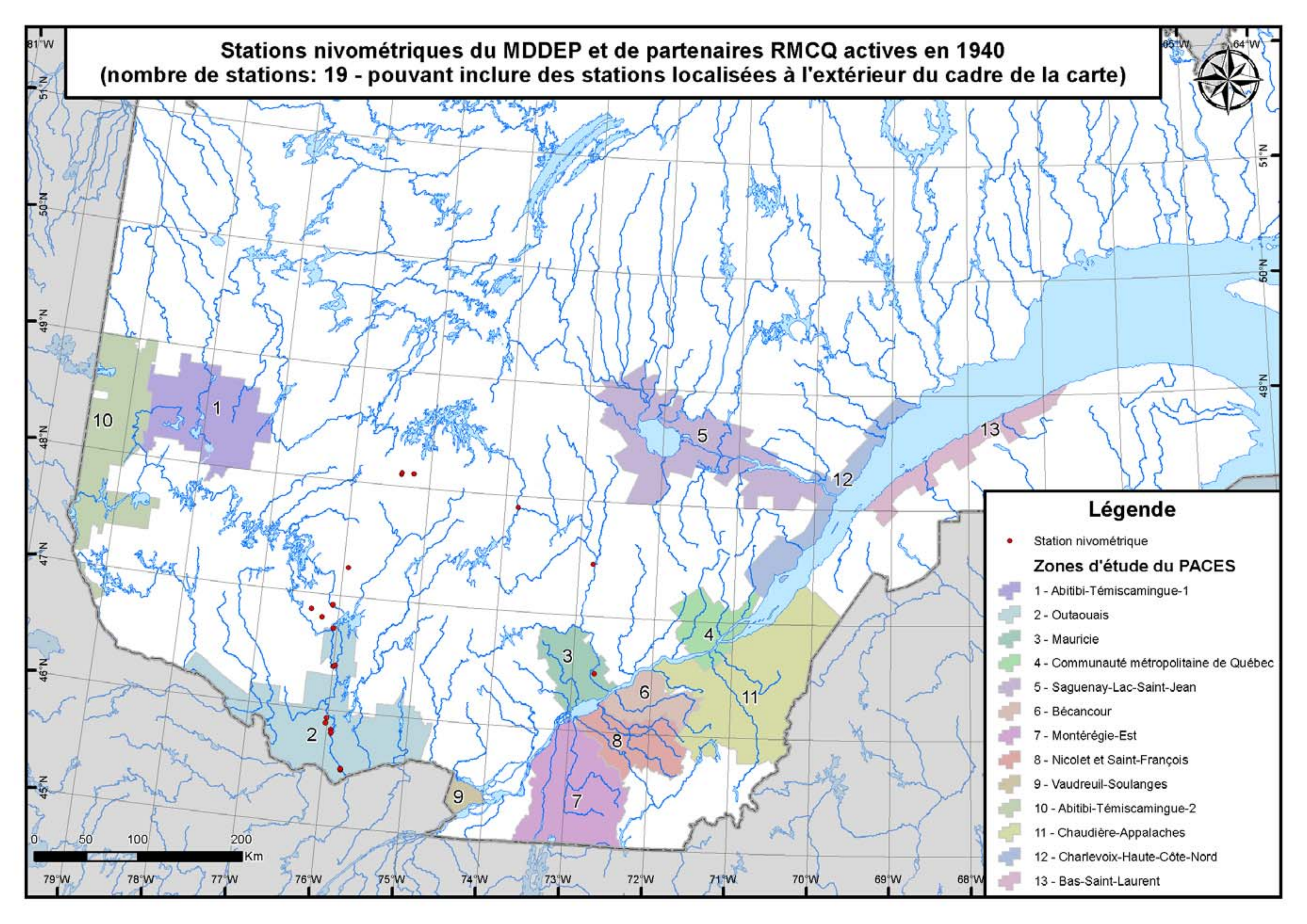
Annexe 7.1 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1928 (première année de l'historique avec de telles stations)



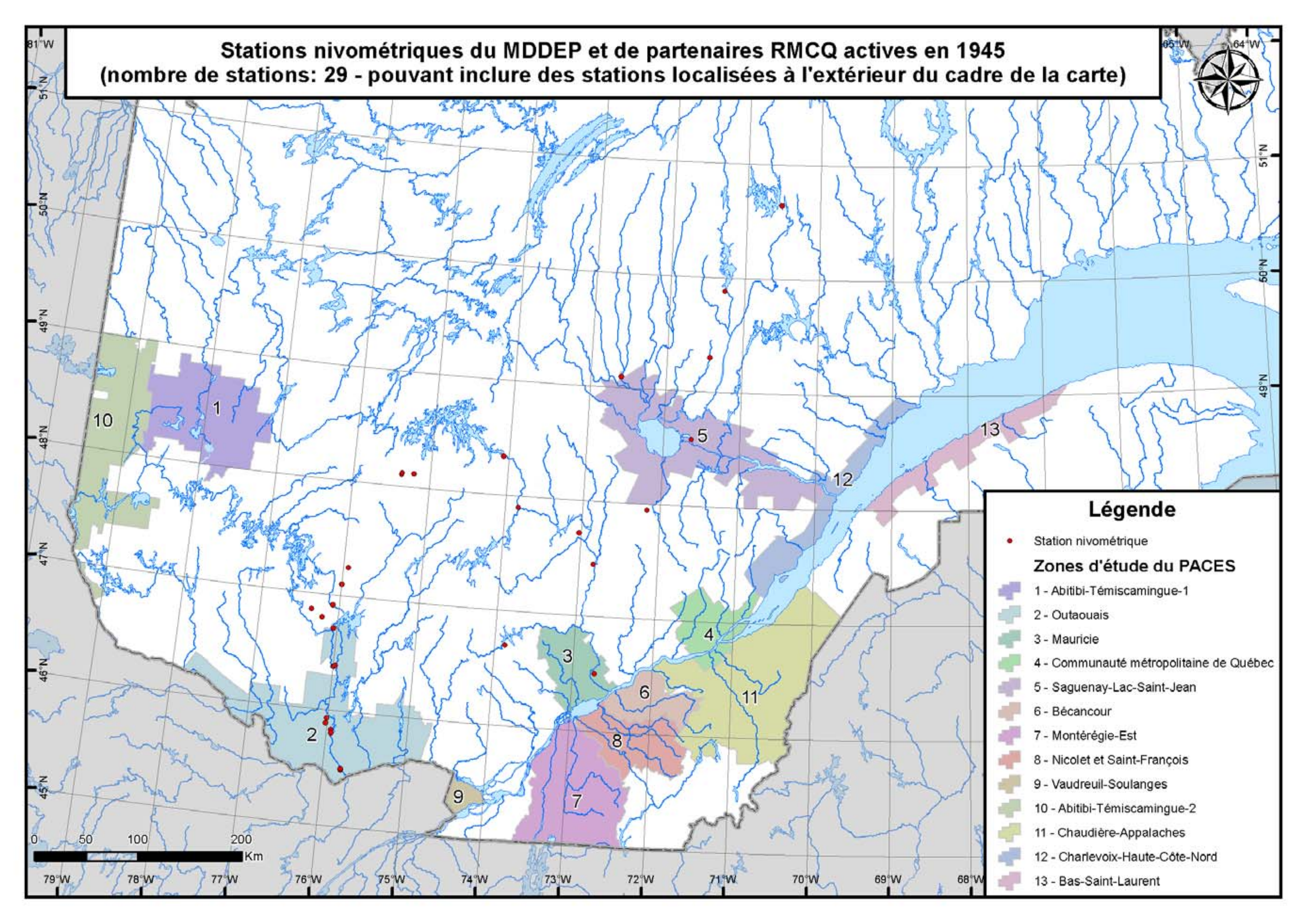
Annexe 7.2 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1930



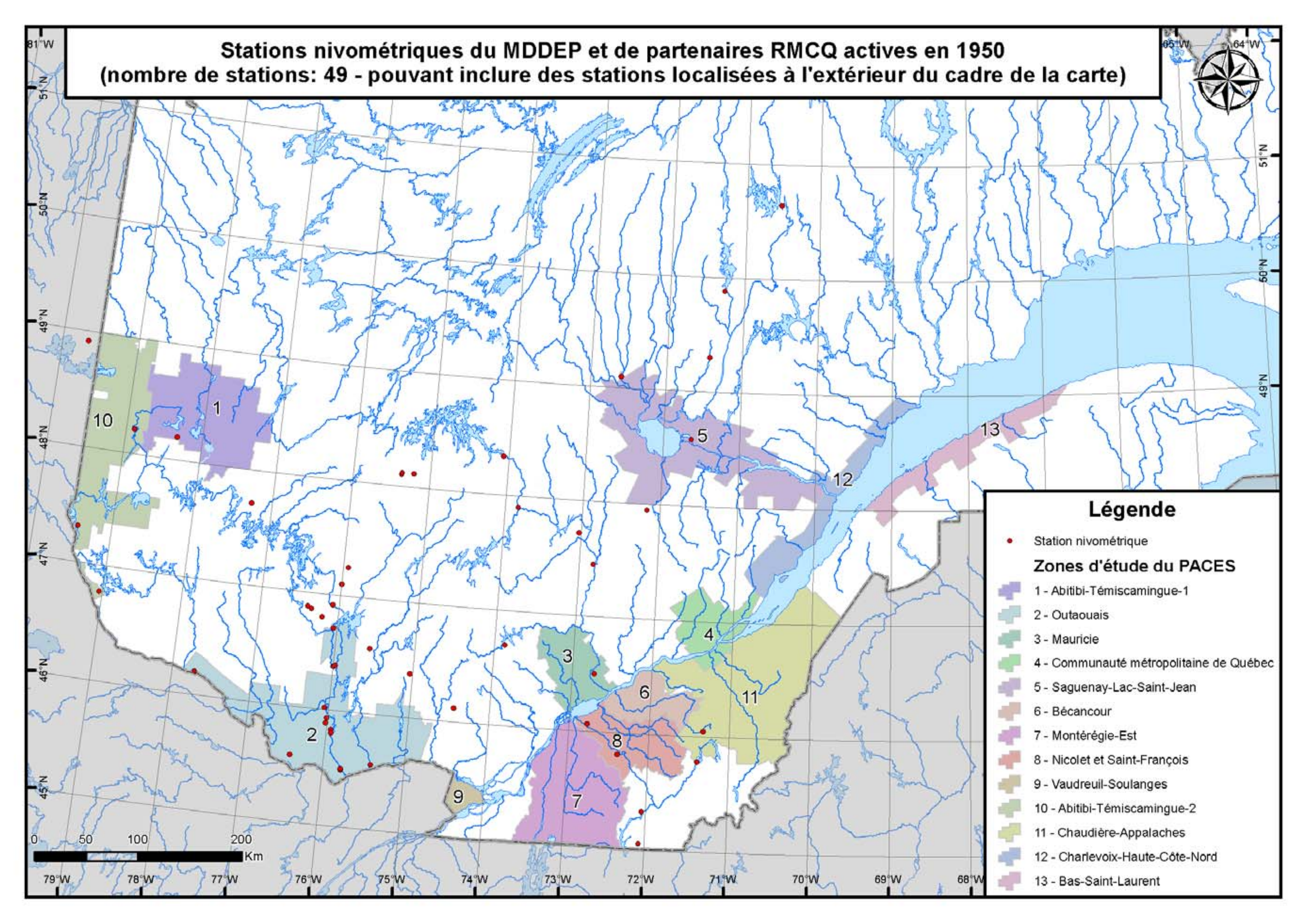
Annexe 7.3 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1935



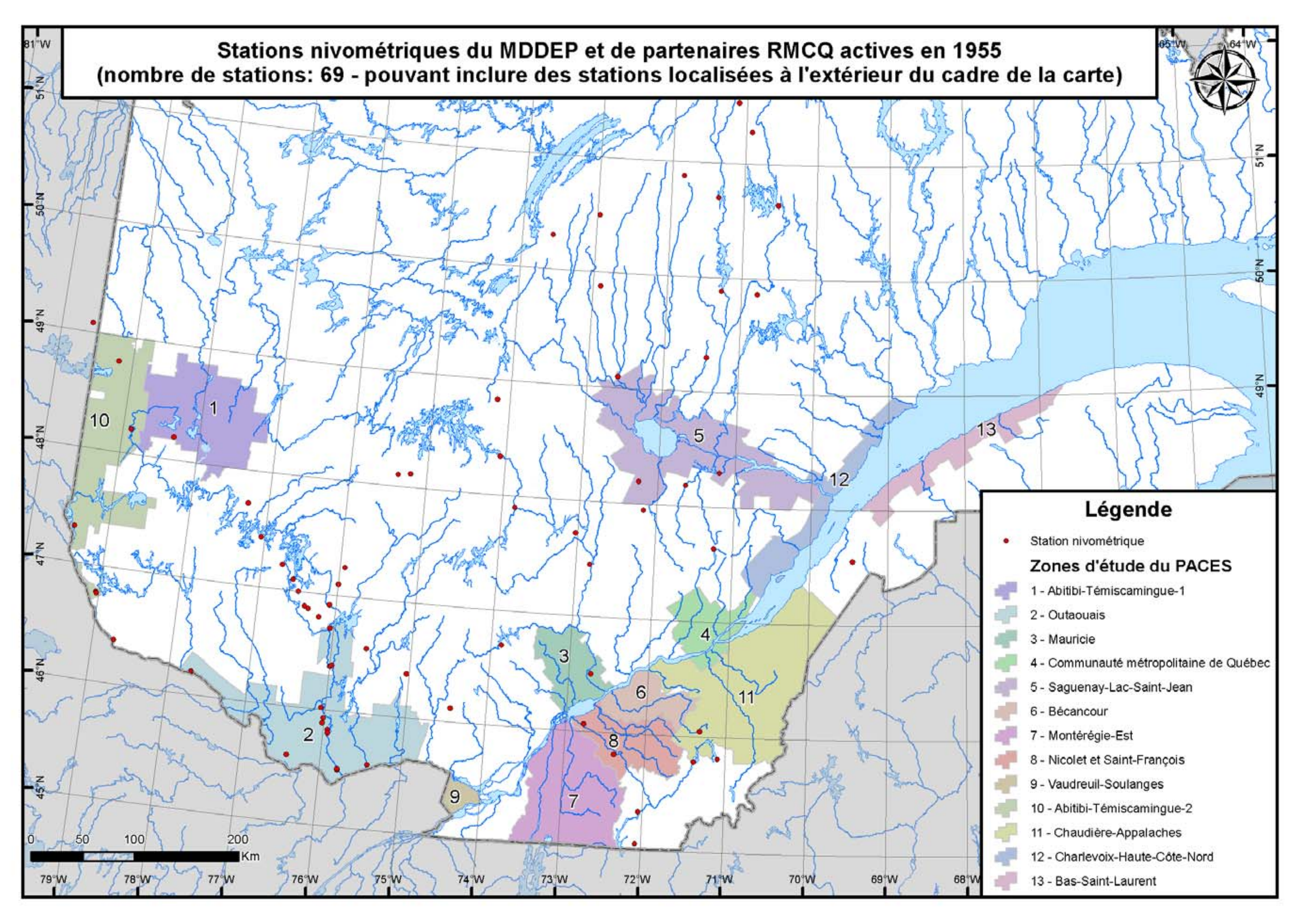
Annexe 7.4 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1940



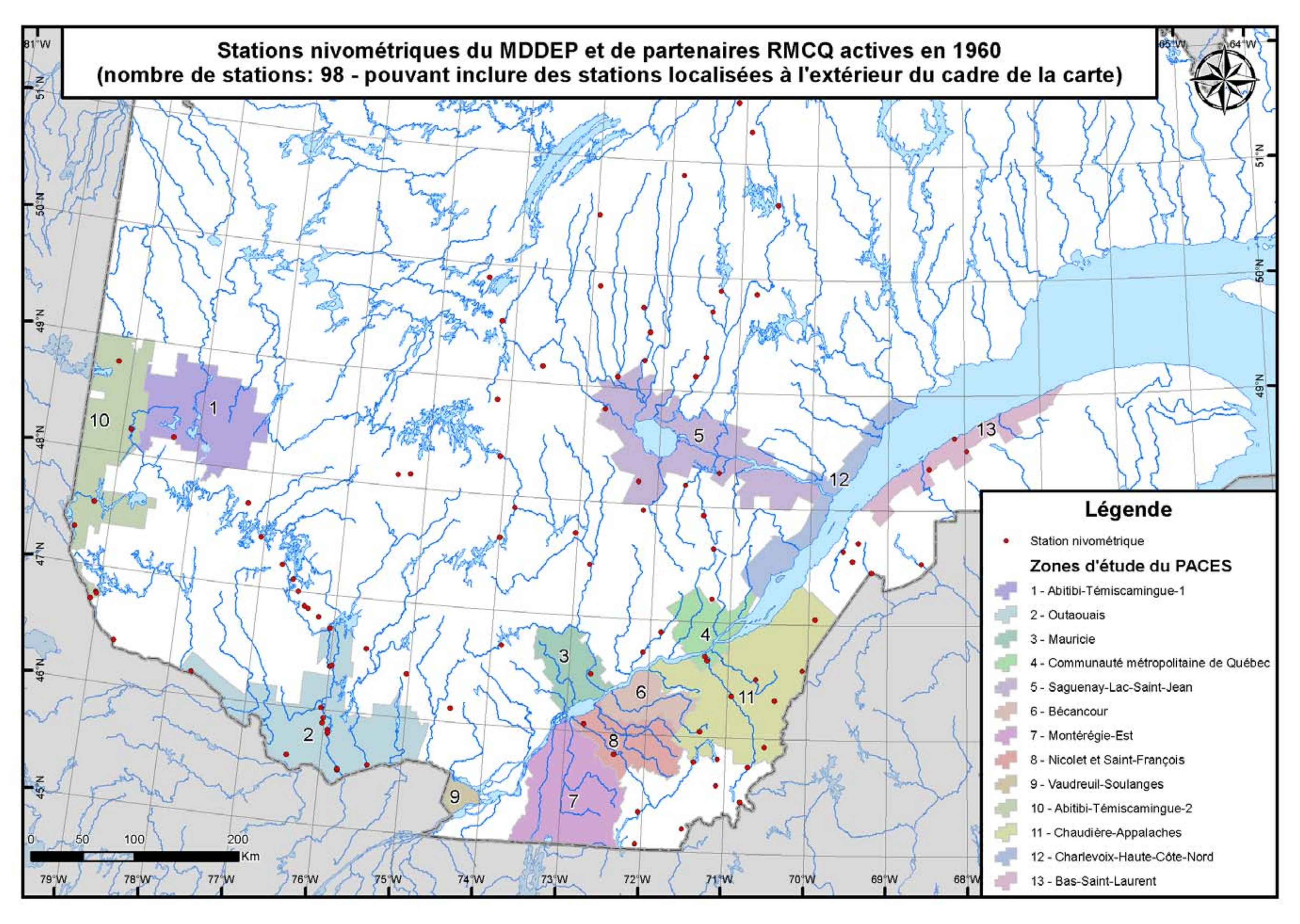
Annexe 7.5 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1945



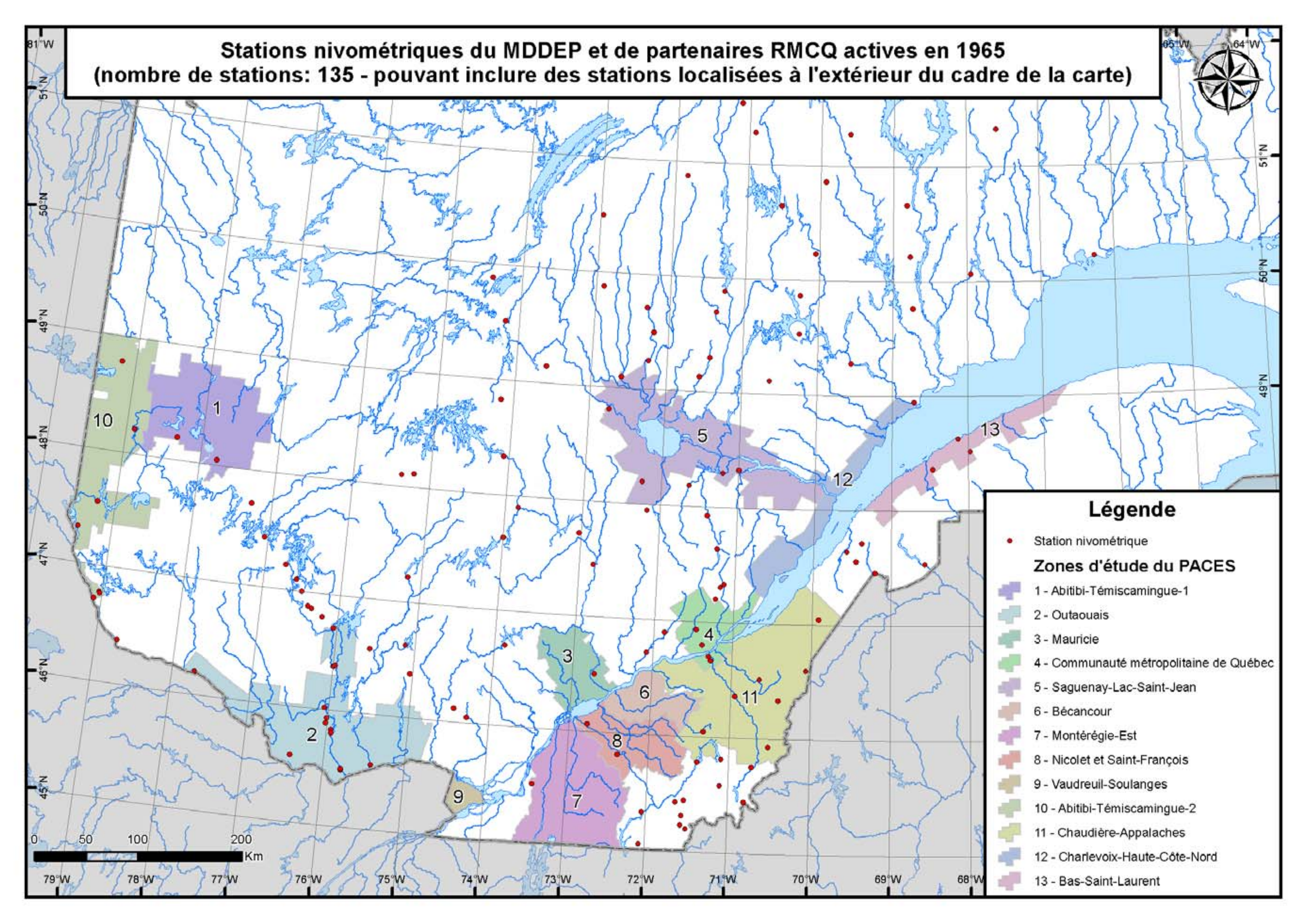
Annexe 7.6 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1950



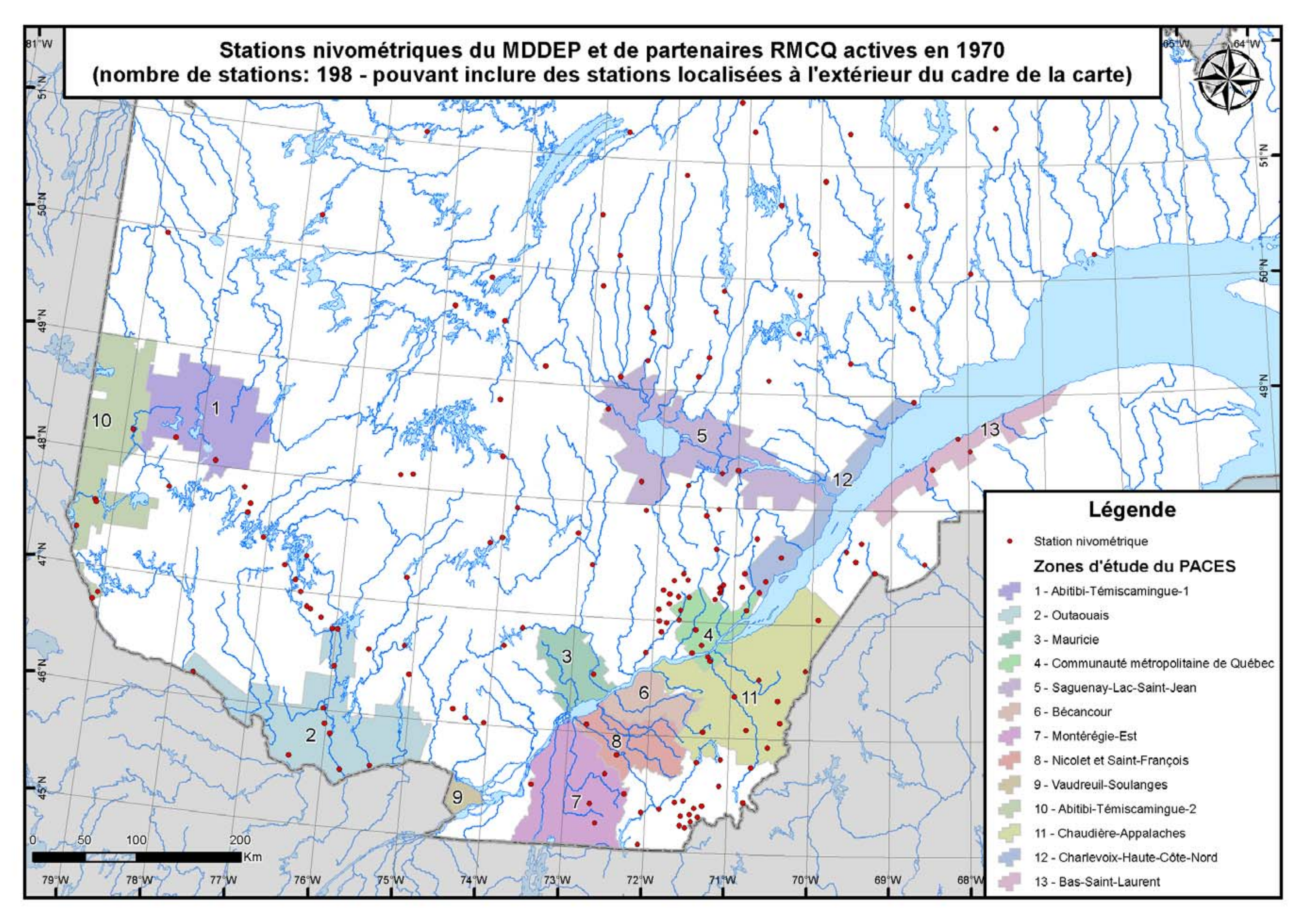
Annexe 7.7 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1955



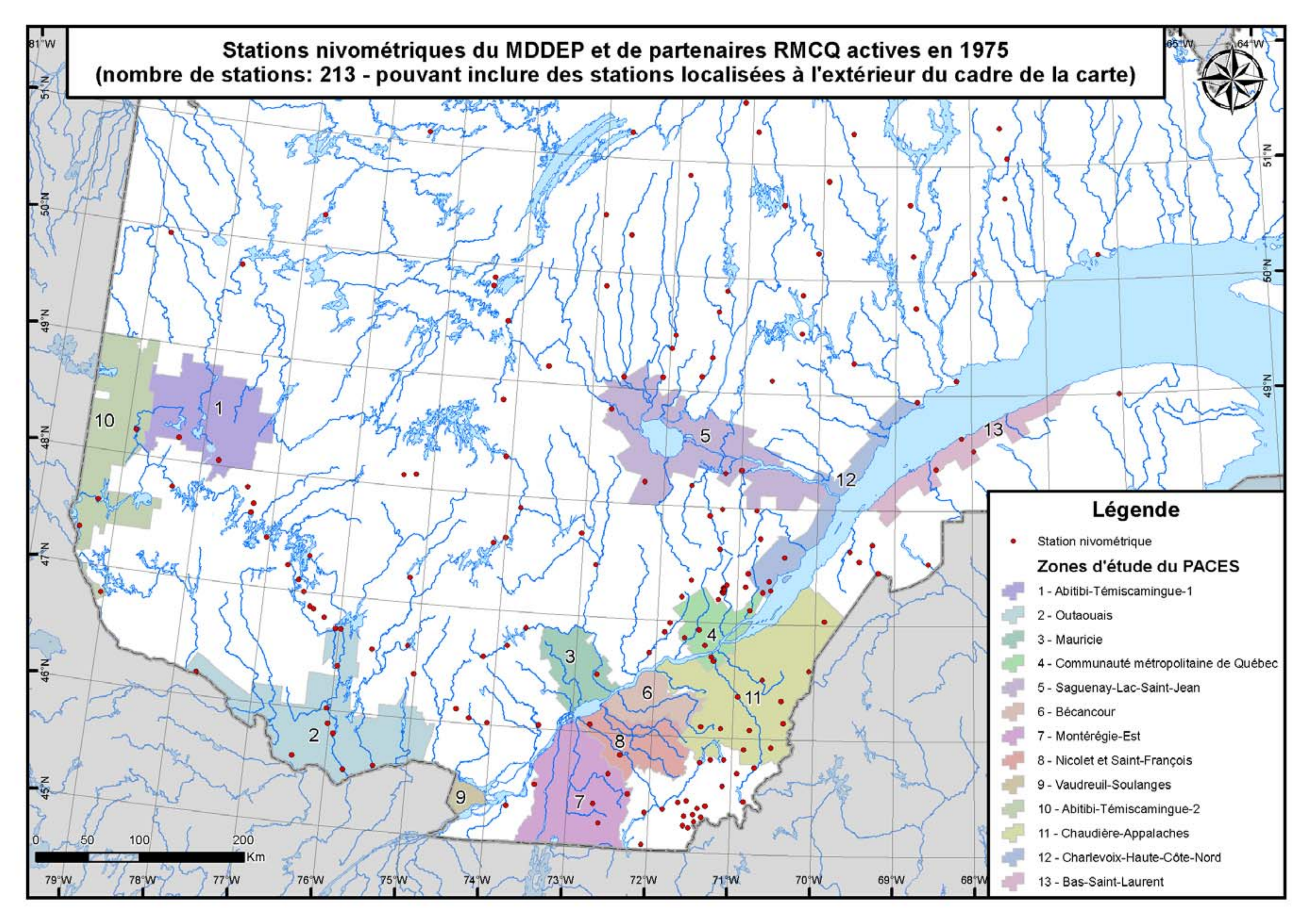
Annexe 7.8 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1960



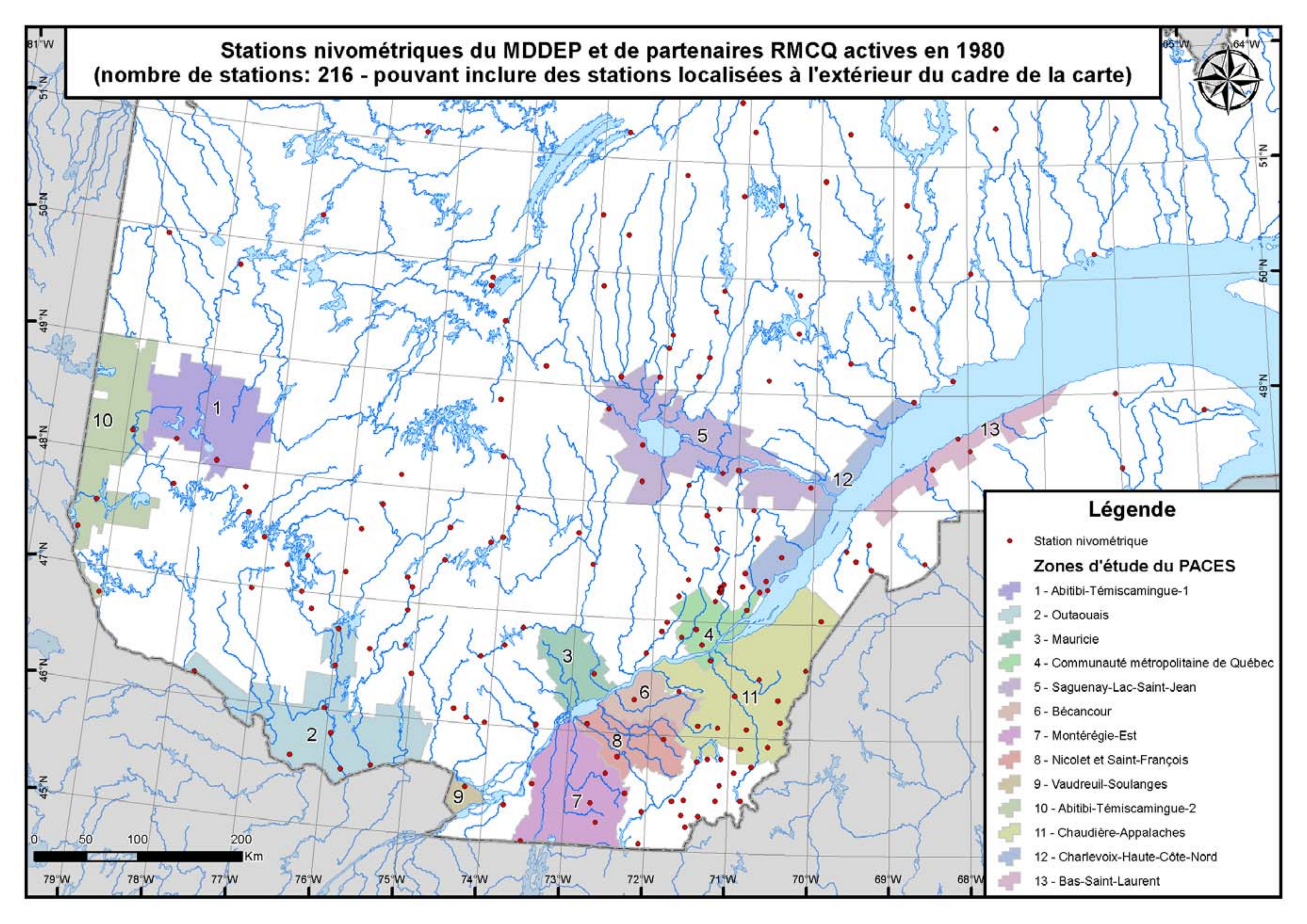
Annexe 7.9 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1965



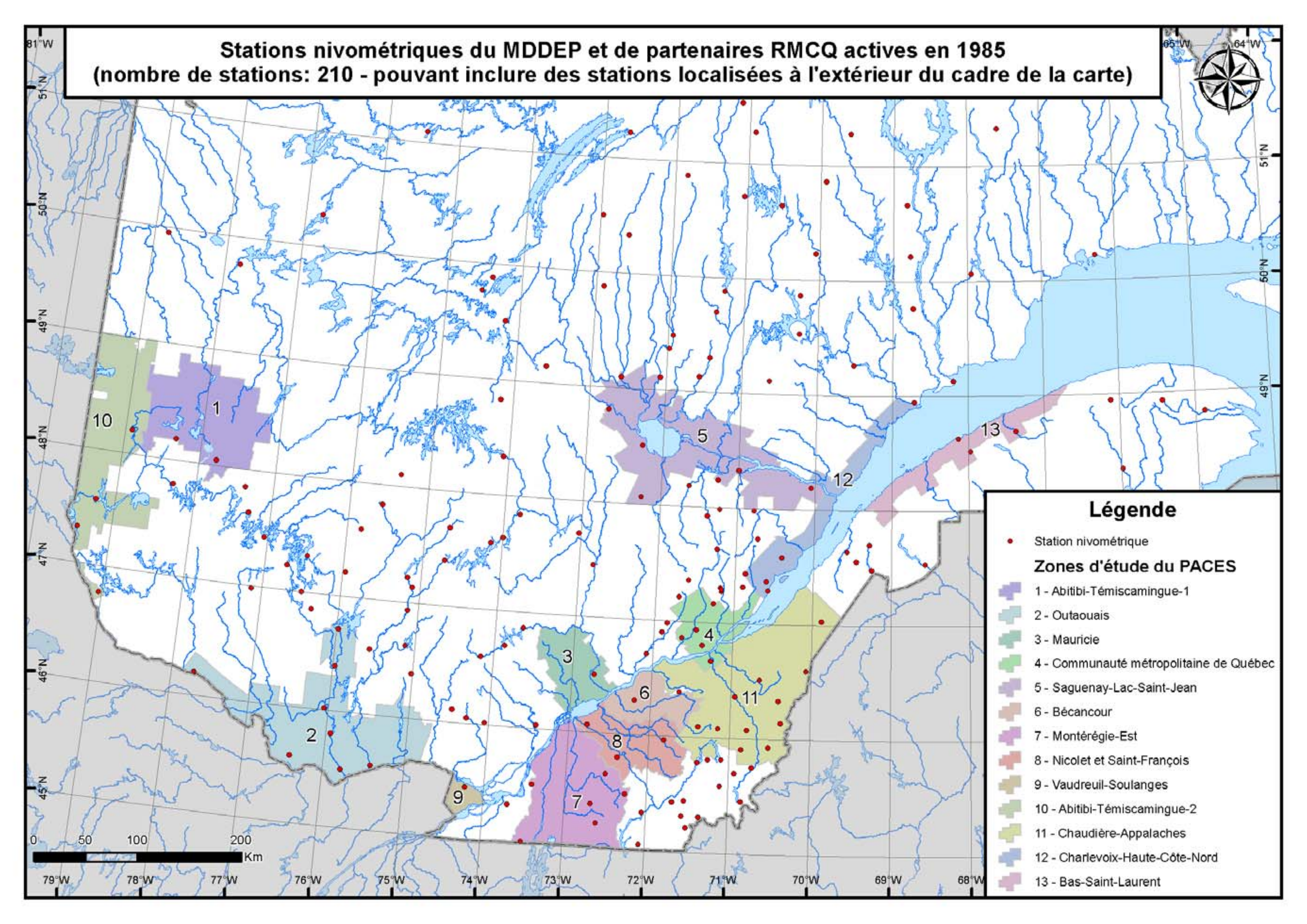
Annexe 7.10 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1970



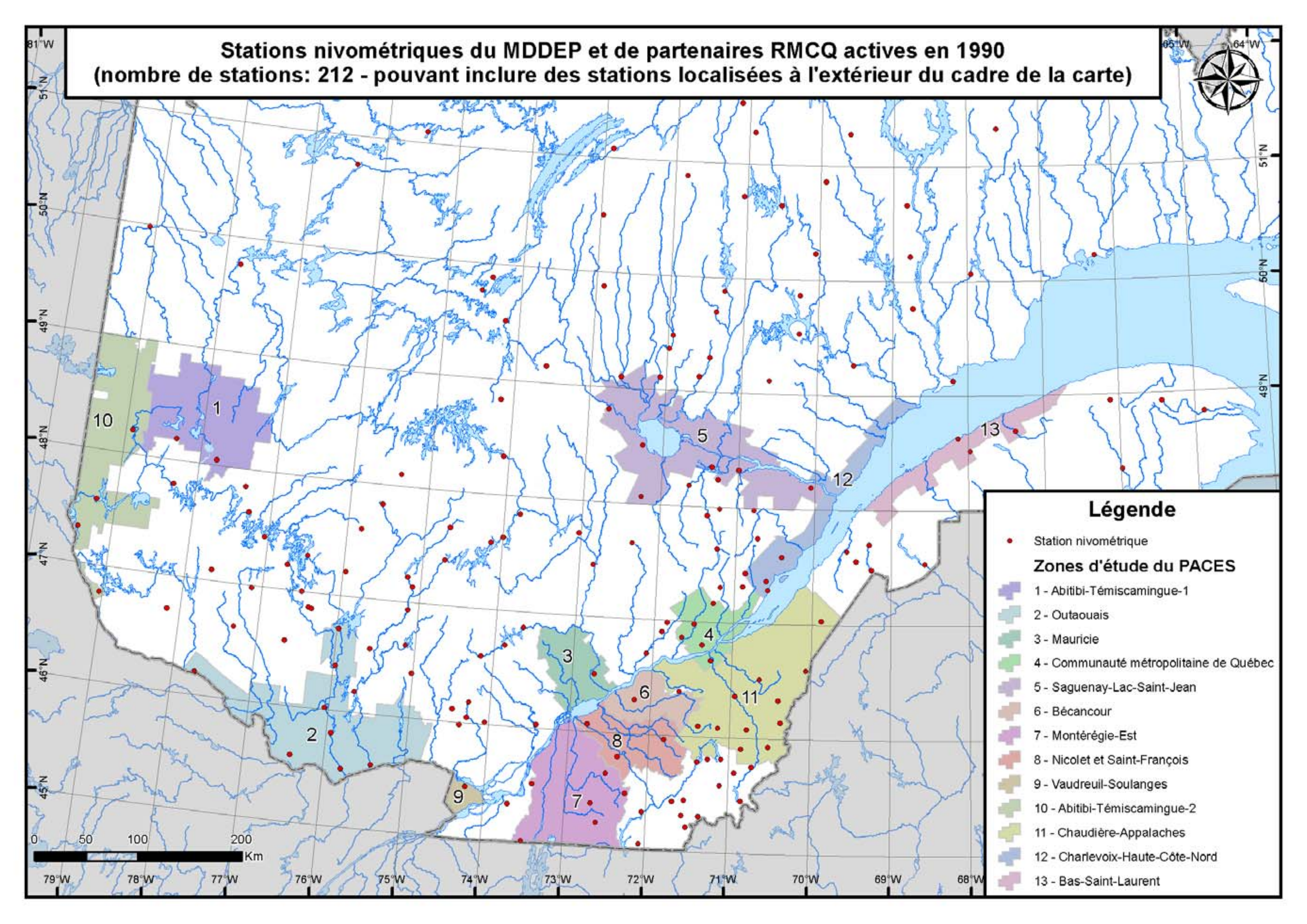
Annexe 7.11 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1975



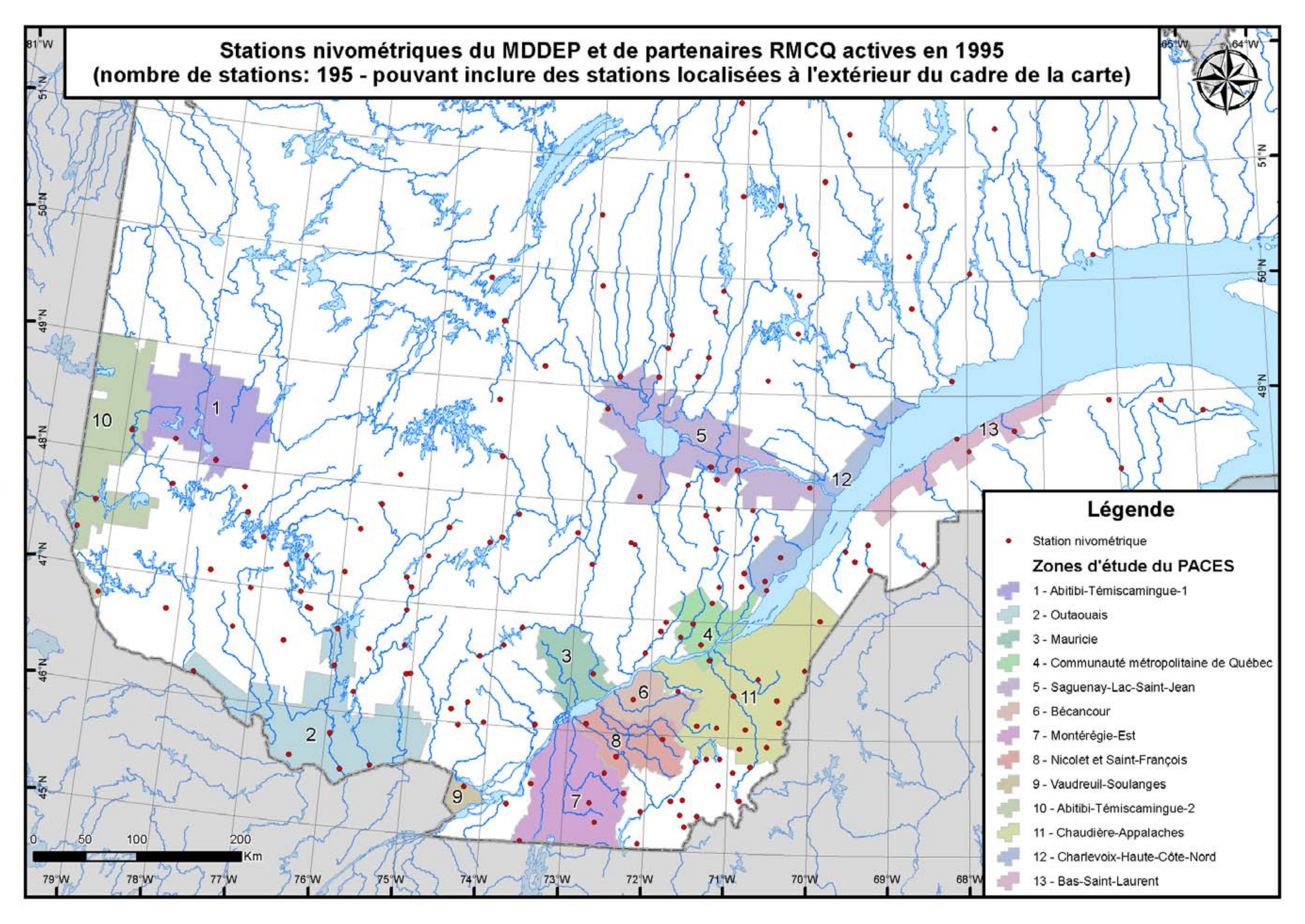
Annexe 7.12 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1980



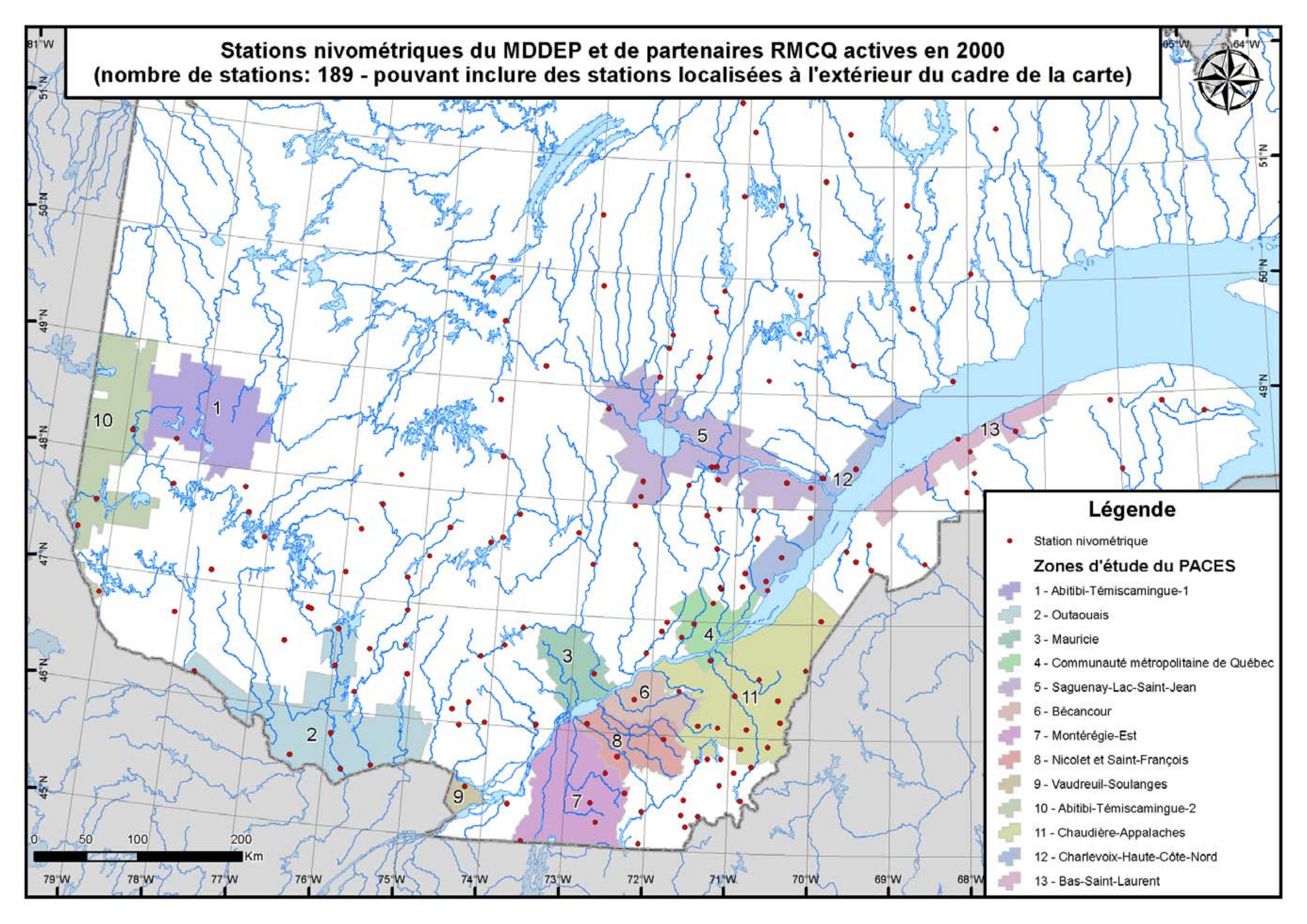
Annexe 7.13 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1985



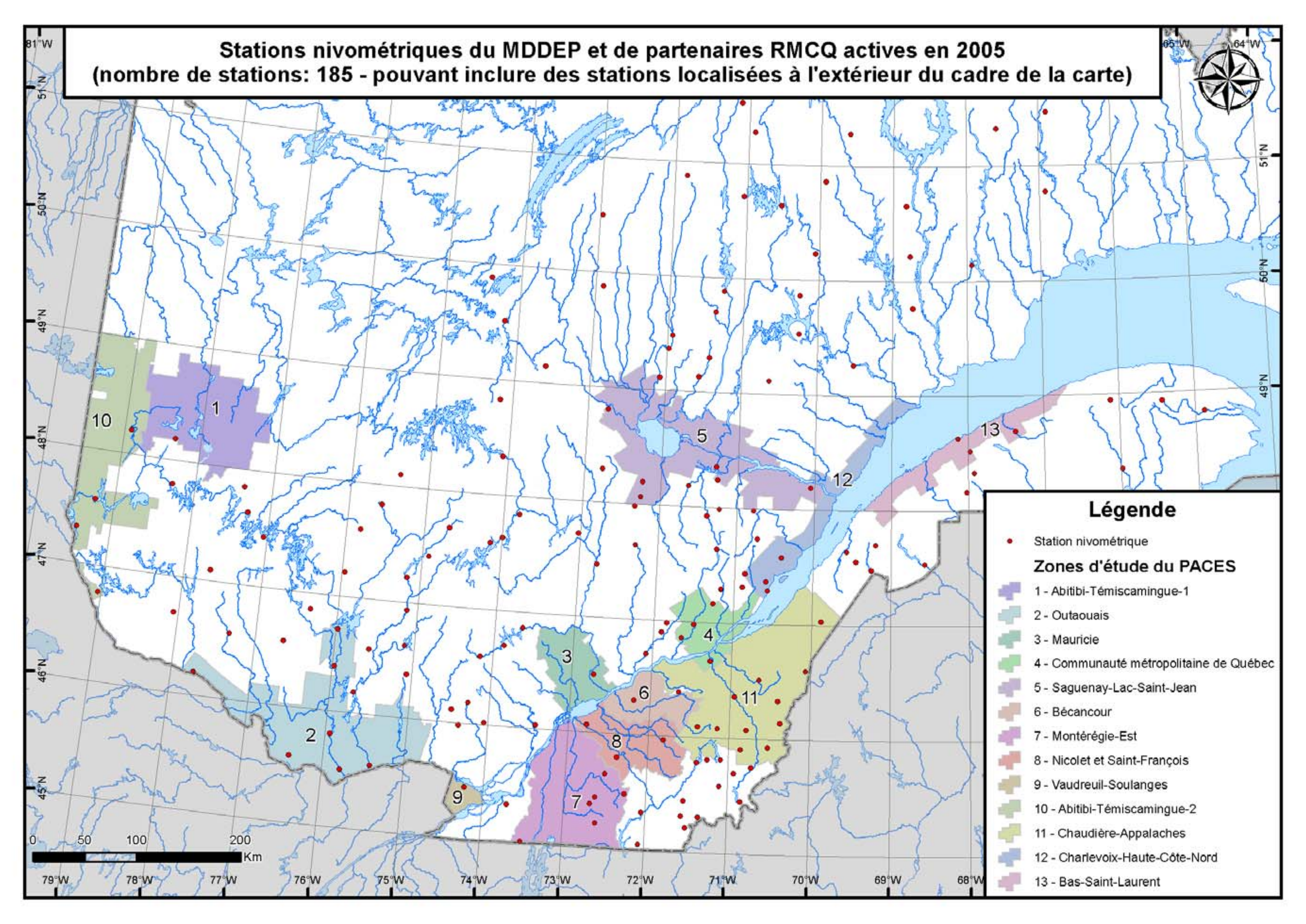
Annexe 7.14 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1990



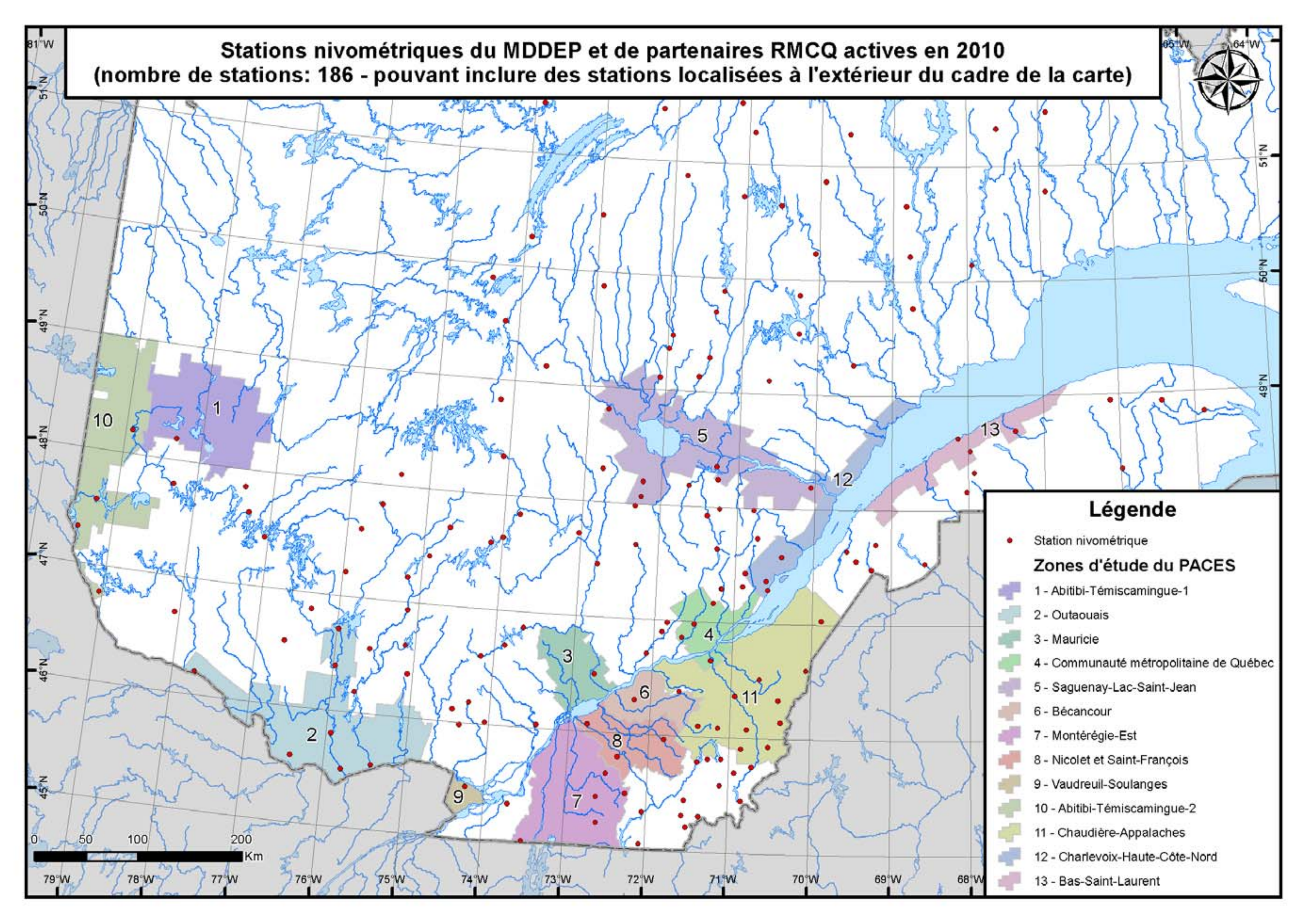
Annexe 7.15 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 1995



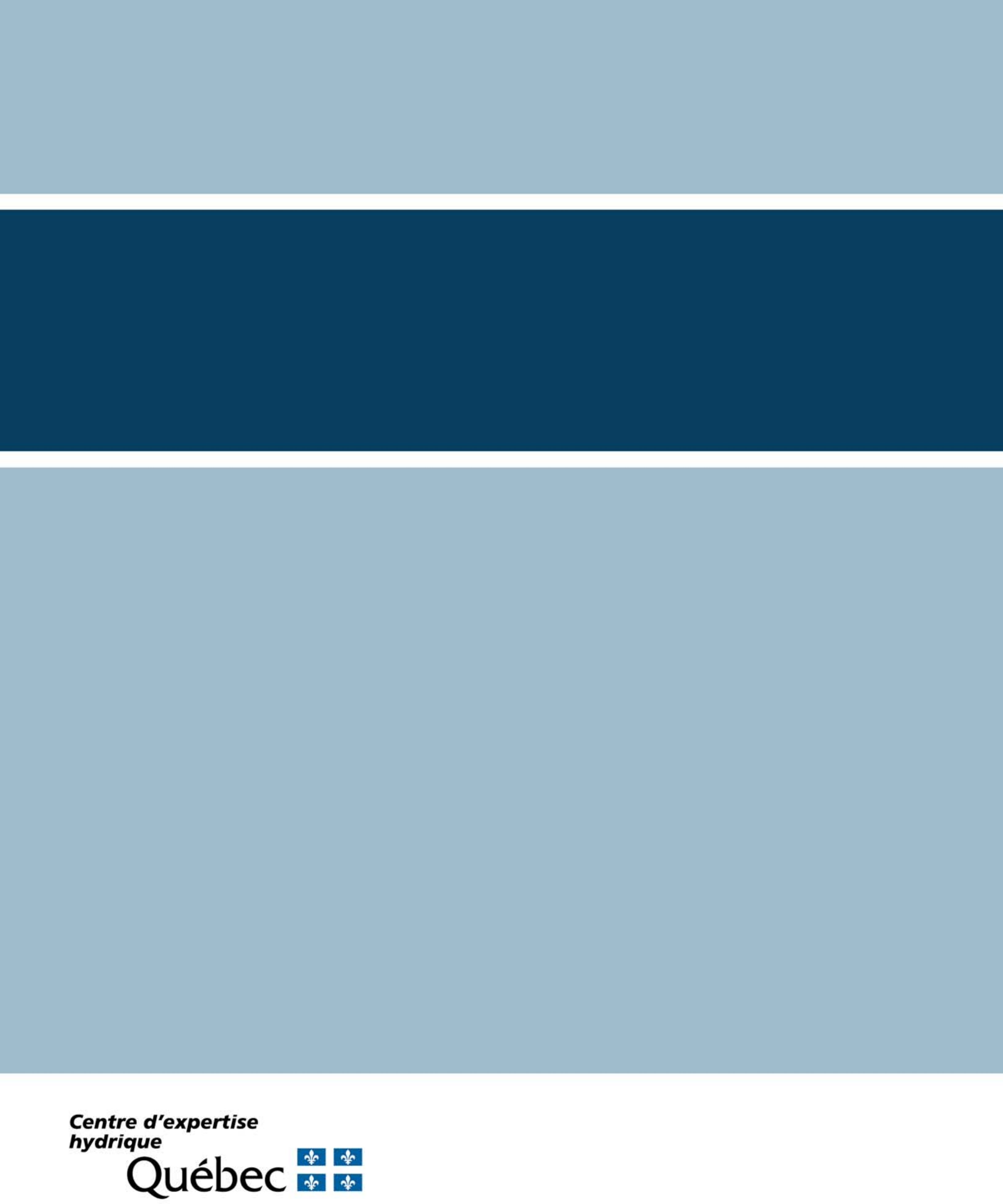
Annexe 7.16 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 2000



Annexe 7.17 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 2005



Annexe 7.18 : Carte illustrant les stations nivométriques ouvertes en 2010



Centre d'expertise
hydrique
Québec